

InSAR 解析に基づく神津島の地表変位と
圧力源に関する研究

令和2年2月

首都大学東京・都市基盤環境学域・探査工学研究室

上原 航

目次

第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 研究目的

第2章 神津島について

- 2.1 神津島の概要
- 2.2 神津島に関する既往の調査

第3章 研究方法

- 3.1 InSAR 解析に基づく地表変位の調査方法について
 - 3.1.1 SAR について
 - 3.1.2 SAR データ
 - 3.1.3 InSAR 解析について
 - 3.1.4 InSAR 解析フロー
- 3.2 InSAR 解析結果の妥当性検討方法
 - 3.2.1 干渉性の検討
 - 3.2.2 伝播遅延補正に関する検討
 - 3.2.3 電子基準点データとの比較検討
 - 3.2.4 異なる SAR データの InSAR 解析結果比較検討
- 3.3 逆解析による圧力源推定
 - 3.3.1 推定モデル
 - 3.3.2 アルゴリズム

第4章 神津島を対象とした InSAR 解析

- 4.1 利用データ
- 4.2 InSAR 解析結果
 - 4.2.1 ALOS-2
 - 4.2.2 Sentinel-1A

第5章 InSAR 解析結果の妥当性に関する検討

5.1 干渉性の検討

5.2 伝播遅延補正による位相変化量に関する検討

5.3 電子基準点データとの比較検討

5.4 異なる SAR データの InSAR 解析結果比較検討

第6章 逆解析による圧力源推定の結果

第7章 InSAR 解析結果を用いた考察

7.1 神津島における長期的な地表変位について

7.2 神津島における短期的な地表変位について

7.2.1 地表変位と周辺水域変色の関連性

7.2.2 推定された圧力源に関する検討

第8章 結論

8.1 まとめ

8.2 今後の課題

引用文献

謝辞

1. 序論

1.1 研究背景

現在、111 の活火山が存在する日本は、世界的な火山大国である。特に、東京都には 20 以上の活火山が存在する。火山を監視している気象庁は、この全国 111 の活火山を対象として、噴火警報・予報を発表している。これは、噴火等の火山活動による災害の防災、減災に繋げる為である。昨今、地震予知などが注目を集めているが、地震予知はまだ研究段階であり、予知は難しいという見解が大勢を占めている。一方、火山噴火予知は観測体制などによっては予知が可能な場合があるために、防災や減災の実現に、より多くの期待を集めている。

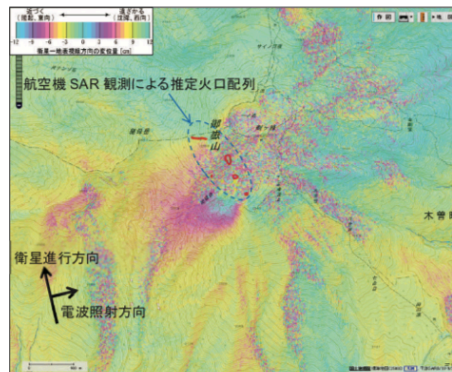
上記のような背景から、日本では気象庁が事務局を務める「火山噴火予知連絡会」が発足した。この火山噴火予知連絡会は、現文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会の建議により計画された火山噴火予知計画により、火山現象についての関係機関の情報交換及び研究成果の共有等を目的としている。

火山に関する調査・観測体制には、GEONET を用いた日本全国の地表変動観測技術をはじめ、宇宙線ミュオンと重力による火山内部の 3D 透視観測や、観測技術衛星による火山噴火及び噴煙の観測等の様々な技術がある。それら様々な観測技術の一つである InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar ; 干渉合成開口レーダ) 解析を本研究にて使用する。

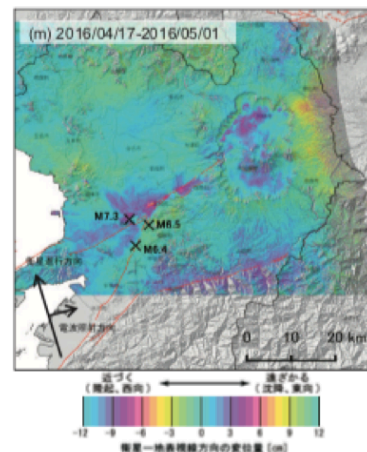
InSAR 解析は、1992 年に起きたランダース地震の解析 (Massonnet et al., 1993) に用いられたことから注目された。この技術は、マイクロ波を用いたリモートセンシングの測地学的応用技術であり、その他の観測では実現不可能なほどの高い空間分解能で、地表変位を把握できることが大きな特徴である。また、地上に観測点を設置する必要がないため、天候や時間帯に左右されずに観測できる。これらの利点から InSAR 解析は、震源近くや火口付近の観測データが重要となる地震や火山の噴火等の現象の調査・研究に用いられている。例えば、国土地理院の測地部及び、地理地殻活動研究センターが実施した InSAR 解析があげられる。同機関では、InSAR 解析により、2014 年 9 月 27 日に発生した御嶽山噴火後の噴火口南西部における衛星視線方向に近づく位相変化を検出し (Fig. 1-1 (a))、この位相変化が地下の浅い位置にある変位源による地殻変動である可能性が高いことを指摘した (山田ほか, 2018)。また、同機関は、2016 年 4 月に発生した熊本地震の余効変動を検出した (Fig. 1-1 b)。(上芝ほか, 2016)

本研究同様に、火山島を対象とした InSAR 解析の適用例としては、気象庁気象研究所が、鹿児島県桜島を対象として InSAR 解析を実施した例 (気象庁気象研究所, 2016)

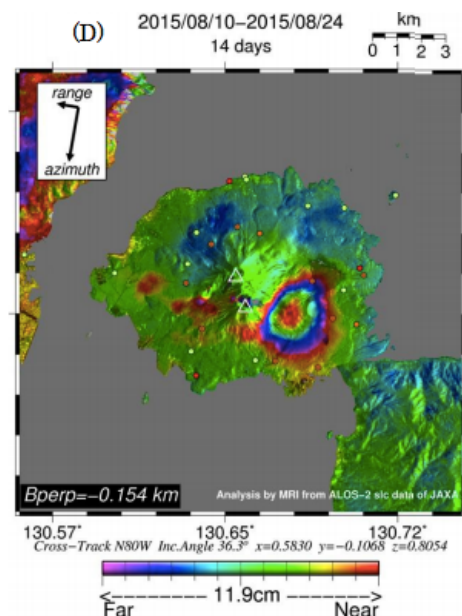
があげられる．同機関では、桜島島内で急激な地震活動が始まった 2015 年 8 月 15 日を含む期間を InSAR 解析し、昭和火口付近を中心とした位相変化を検出した (Fig. 1-1 c)．また、地表の対象物からのレーダ反射波の強度を示す強度画像 (Fig. 1-1 d) を解析したところ、昭和火口内に明瞭な強度変化を確認し、これが火山噴出物などの堆積が原因である可能性を指摘している．



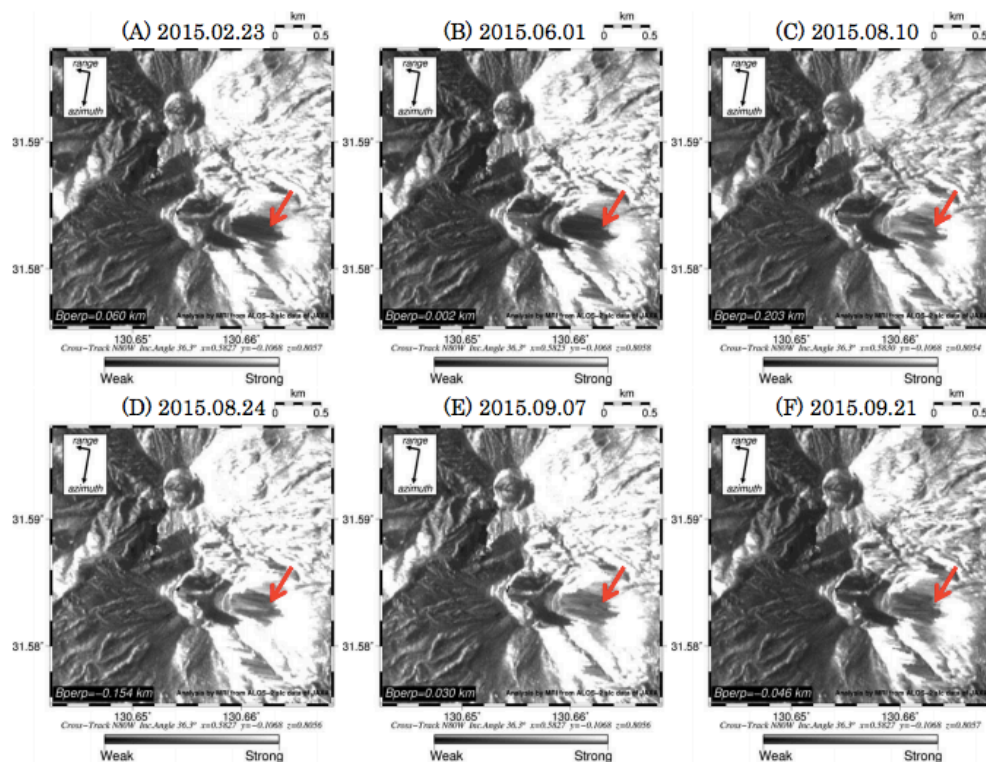
(a) 御嶽山噴火口南西部の位相変化
(山田ほか, 2018)



(b) 熊本地震の余効変動を示す位相変化
(上芝ほか, 2016)



(c) 桜島昭和火口付近の位相変化の様子 (気象庁気象研究所, 2016)



(d) 桜島昭和火口付近の強度変化の様子（気象庁気象研究所，2016）

Fig. 1-1 InSAR 解析の適用例

また、InSAR 解析などにより明らかになった地表変位の情報から、火山内部の圧力源モデルや、火山活動に伴うマグマ輸送を推定する研究が多く発表されている（例えば、Aoki et al., 1999 ; Amelunget et al., 2000 ; 山崎, 2017）．本研究においても、InSAR 解析結果を逆解析することにより、火山内部の圧力源推定を行った．具体的には、球状の圧力源モデル（Mogi, 1958）を想定し、その位置と体積変化量を InSAR 解析結果から逆解析した．この逆解析のアルゴリズムには、最適解探索において大域的な最適解を求めやすい特徴を持つ焼きなまし法（Kirkpatrick et al., 1983）を採用した．さらに詳しい説明は、第 3 章にて行うこととする．

1.2 研究目的

本研究では、噴火等の火山活動に伴う災害の防災、減災に繋がる研究の一環として、火山島の地表変位を InSAR 解析によって把握し、さらに、逆解析による火山内部の圧力源に関する推定を行うことを目的とした．

なお，本研究では，東京都の火山島である神津島を対象として研究を行う．また，火山活動と地表変位の関連性を検討するにあたって，神津島周辺で観測された周辺水域の変色を取り上げ，その関連性を検討する．

2. 神津島について

2.1 神津島の概要

研究対象とする神津島の位置と地形図，外観図を Fig. 2-1 に示す．神津島は，伊豆諸島の一つで，活火山の火山島である．島の形は，南北にひょうたん型であり，活火山である天上山を中心とした北部と，秩父山のある南部からなる．天上山は，標高 572 m で 9 世紀の噴火にて形成された溶岩ドームである．「続日本後紀」によると，大規模な噴火は，西暦 838 年（承和 5 年）に発生したと記録されている．全体の地質は，流紋岩の溶岩ドーム群と火砕岩である．2000 年に噴火した伊豆諸島三宅島の北西約 30 km に位置する．



Fig. 2-1 上図：神津島の位置（地理院地図より作成），下図左：地形図（地理院地図より作成），下図右：外観図

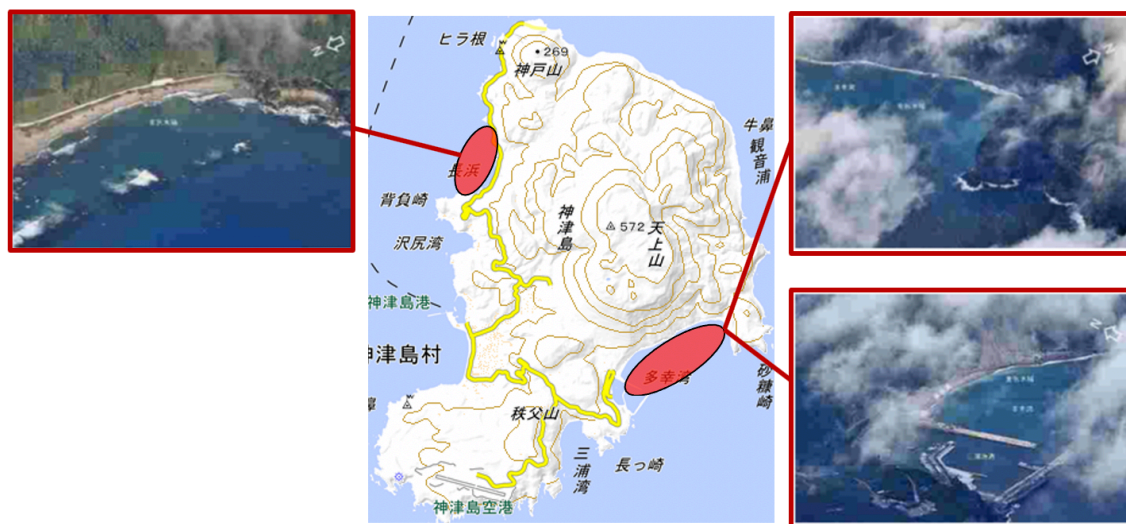
(<https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/rito/island/kouzushima.html>)

2.2 神津島に関する既往の調査

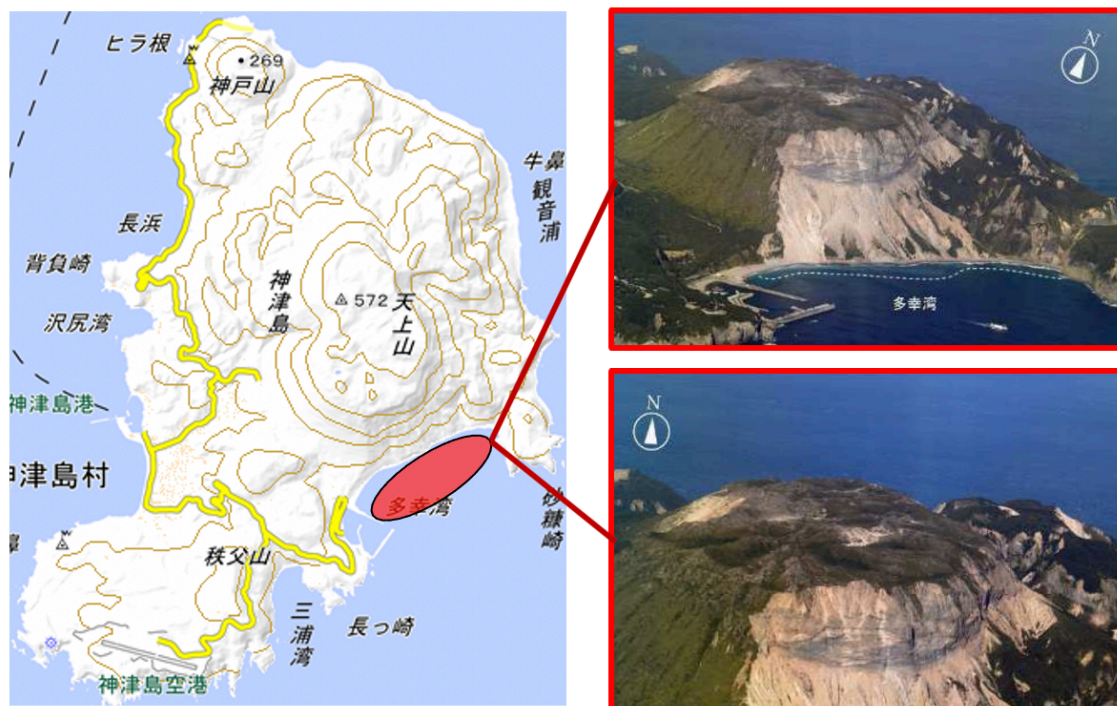
本研究では、火山災害の防災・減災につながる研究の一環として、火山活動と地表変位の関連性を検討した。神津島周辺で発生した火山活動に関しては、火山噴火予知連絡会が公表している資料を用いる。火山噴火予知連絡会は、1.1 でも述べたように、火山噴火予知計画により、関係機関の研究及び業務に関する成果や情報の交換、火山現象についての総合的判断を行うこと等を目的として設置された。そのため、火山噴火予知連絡会が公表している資料を確認することで、研究対象である神津島及びその周辺で観測された火山活動についての情報を得ることができる。

なお、本研究では、InSAR 解析の対象期間を、2014 年 12 月から 2018 年 12 月としている。そのため、上記対象期間に神津島において観測された火山活動を調べた。2014 年以降、火山噴火予知連絡会資料の概況にて、周辺水域の変色は 1 度目から順に、2015 年 8 月 18 日、2016 年 12 月 24 日、2017 年 3 月 14 日、2017 年 6 月 27 日、2018 年 3 月 3 日の計 5 回観測されている。これらは、火山活動に伴い発生した現象である可能性が高いと考えられるため、これらのイベントに着目した。

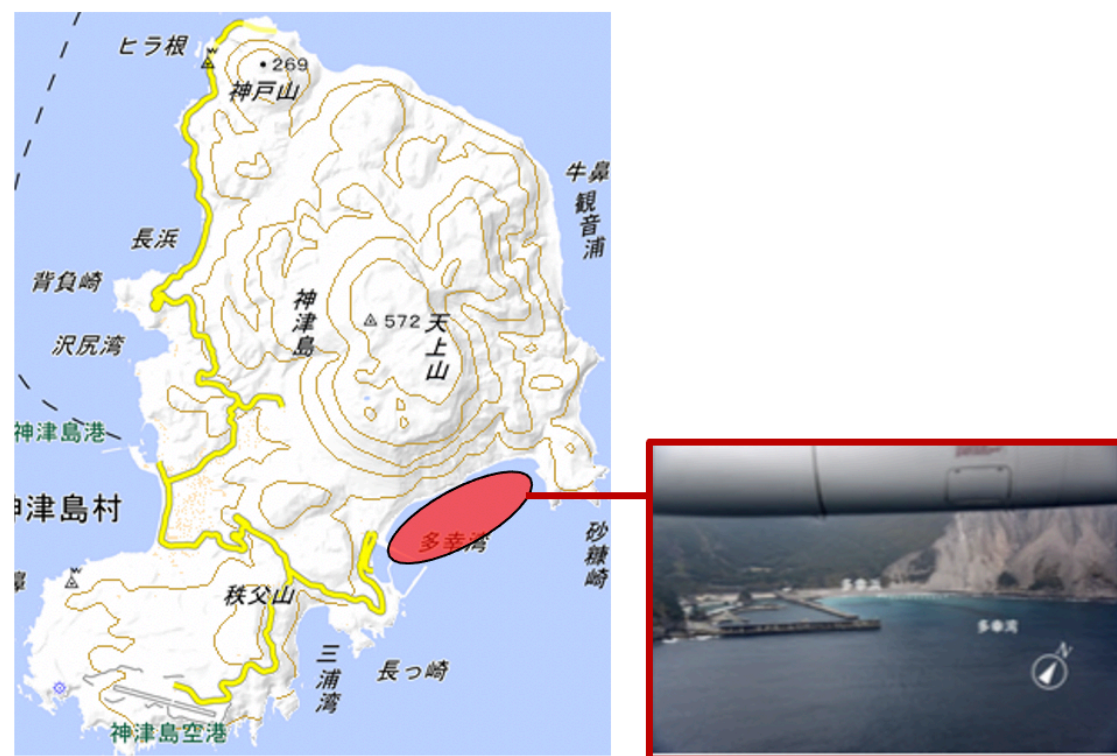
火山島の周辺水域で変色が観測されることは、特段珍しいことでは無い。また、変色の原因は、火山海底部の噴出口から漏れ出す噴出物である可能性が考えられ、それに関する論文も多く発表されている（例えば、福島ほか（1981））。そのため、神津島周辺水域で観測された変色においても、火山活動によって海底噴出口から漏れ出した噴出物が原因である可能性が考えられる。



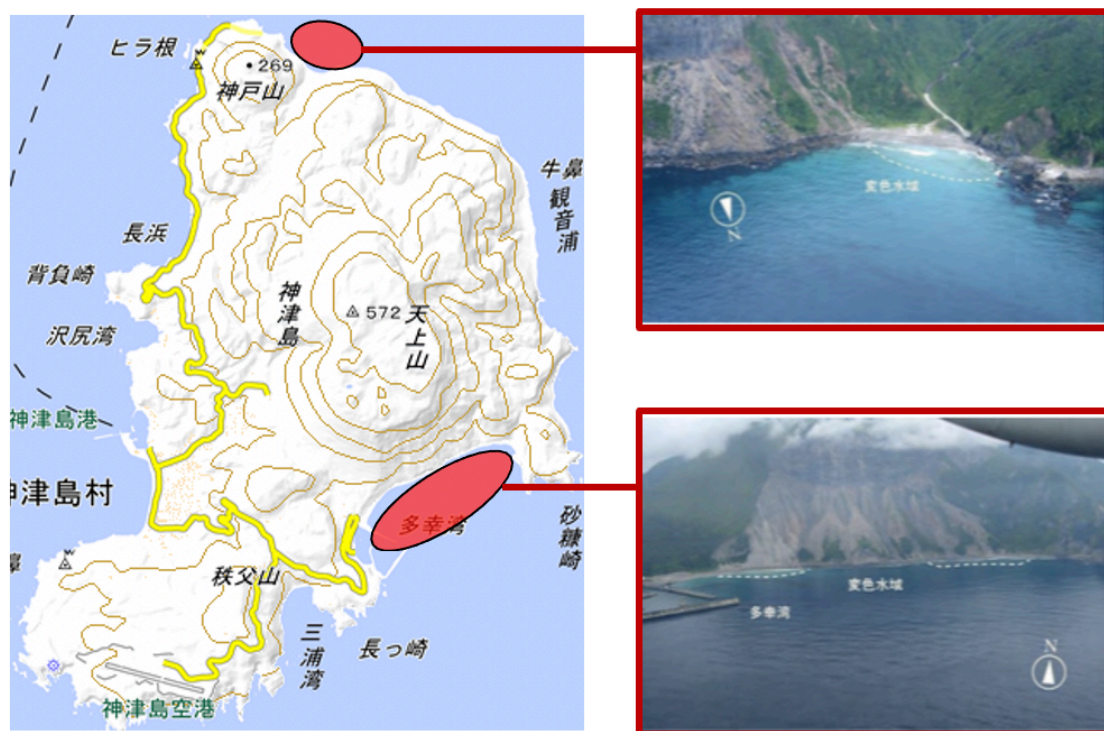
(a) 2015 年 8 月 18 日の変色水域の様子



(b) 2016 年 12 月 24 日の変色水域の様子



(c) 2017 年 3 月 14 日の変色水域の様子



(d) 2017 年 6 月 27 日の変色水域の様子



(e) 2018 年 3 月 3 日の変色水域の様子

Fig. 2-2 神津島周辺で観測された水域変色（地理院地図，火山噴火予知連絡会資料より作成）

また、神津島では、島の北東部を中心とした年間数 cm 程度の膨張変動が進行していることが明らかとなっている（名古屋大学大学院理学研究科ほか，2001）．これは，1995 年より国土地理院が，翌年 1996 年より名古屋大学がそれぞれ GNSS（Global Navigation Satellite System；全球測位衛星システム）による観測を実施，その他の伊豆諸島には無い地表変動の存在が認められ，神津島北東部に電子基準点「神津島 2」が増設されたことから明らかとなった．名古屋大学大学院理学研究科ほか（2001）では，神津島における膨張変動に球状の圧力源モデル（茂木モデル）を適用した結果，神津島北東部深さ 2 km に膨張ソースが推定されている（Fig. 2-3）．

さらに，三宅島にて 2000 年に発生した噴火に伴い，三宅島北西部から神津島東部にかけてダイクの貫入が酒井ほか（2001）で指摘されている．神津島では，このダイク貫入によるものと考えられる地表変位が観測されており，名古屋大学大学院理学研究科（2001）では，島北東部に傾斜する形で最大 25 cm の隆起が生じた可能性を示唆している．

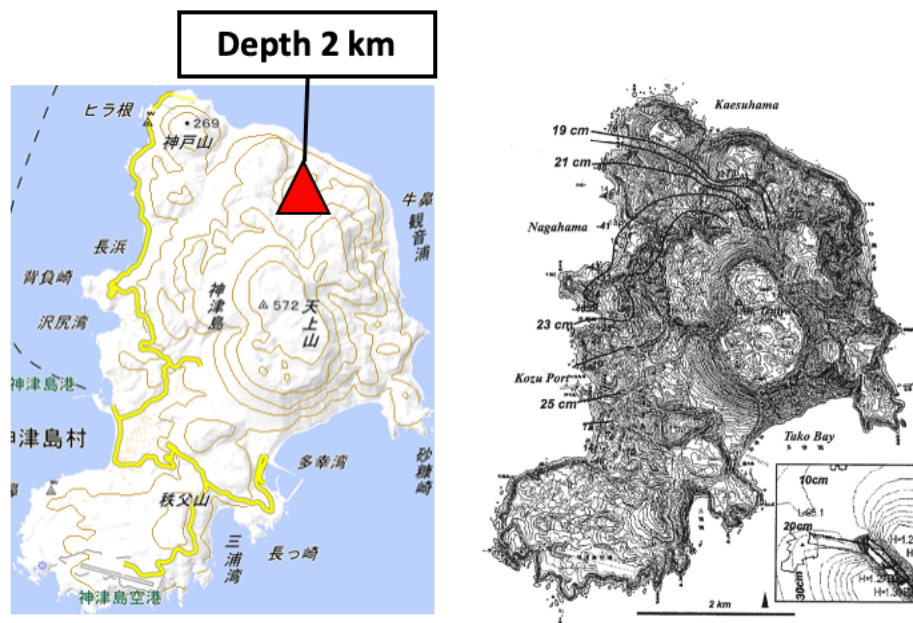


Fig. 2-3 名古屋大学大学院理学研究科ほか（2001）で推定された圧力源位置（左図；（地理院地図より作成）と，2000 年 1 月～2001 年 4 月までの地表変位（右図）

3. 研究方法

3.1 InSAR 解析に基づく地表変位の調査方法について

本研究は、前述のように、InSAR 解析を用いて地表変位を把握する。InSAR 解析とは、異なる時期に SAR が取得した複数のデータを干渉させ、地表の変位を把握する技術である。

3.1.1 SAR について

SAR とは、前述のように、Synthetic Aperture Radar（合成開口レーダ）の略であり、搭載された衛星より斜め下方向に電波（マイクロ波）を照射し、地表面からの反射波（後方散乱波）を受信することで地表の情報を観測する。SAR の観測画像は、数 m～数 10 m の高解像度でありながら、数 100 km 平方の地表変位を観測できる。一般的に、画像の解像度はアンテナサイズに比例する。SAR は、搭載衛星が移動しながら電波を送受信することで、仮想的に大きな開口（アンテナの大きさ）を合成し、高解像度の観測画像を得る。合成開口技術の図解を Fig. 3-1 に示す。

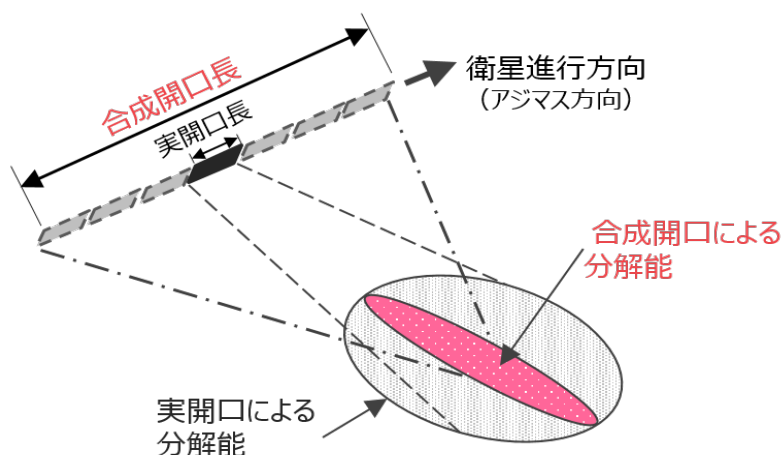


Fig. 3-1 合成開口技術図解（国土地理院）

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html

3.1.2 SAR データ

本研究では、SAR を搭載した 2 種類の衛星が、それぞれ取得した SAR 観測データ（以下、SAR データ）を用いる。2 種類の衛星とは、日本の宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）が 2014 年に打ち上げた陸域観測技術衛星 2 号（以下、ALOS-2）と、欧州連合（以下、EU）の機関である欧州宇宙機関（以下、ESA）が同年に打ち上げた Sentinel-1 である。

ALOS-2 は、陸域観測技術衛星 ALOS の後継機であり、地域観測・災害状況把握・資源探査などの幅広い分野で利用されている。ALOS-2 の外観、主要諸元をそれぞれ Fig. 3-2, Table 3-1 に示す。なお、ALOS-2 は北行き軌道（以下、Ascending）と南行き軌道（以下、Descending）の 2 種類の軌道で観測を行っており、本研究では、その両方を利用した。

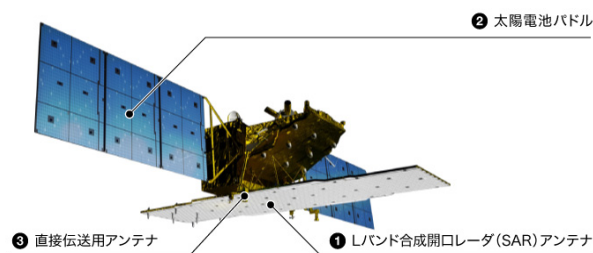


Fig. 3-2 ALOS-2 外観 (JAXA)

<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos2/>

Table 3-1 ALOS-2 主要諸元, 照射角と方位角に関しては、本研究に用いるデータ取得時の角度を示す

打ち上げ日時	2014年5月24日
設計寿命	5年（目標7年）
高度	約628 km
回帰日数	14日
観測機器	PALSAR-2（Lバンド）
観測波長	23.84 cm
照射角	約42.9°（A）
	約39.6°（D）
方位角	約−9.6°（A）
	約190.0°（D）

Sentinel-1 は、ESA によって運用されており、海面や地表面のマッピング、資源利用、防災など広範囲で利用されている。なお、Sentinel-1 は、Sentinel-1A, B の 2 つの衛星が同時運用されているが、本研究では、Sentinel-1A が取得したデータのみを利用する。Sentinel-1 の外観、主要諸元をそれぞれ Fig. 3-3, Table 3-2 に示す。



Fig. 3-3 Sentinel-1A 外観 (ESA)

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>

Table 3-2 Sentinel-1 主要諸元, 照射角と方位角に関しては, 本研究に用いるデータ取得時の角度を示す

打ち上げ日時	2014/4/3 (A)
設計寿命	7年
高度	693 km
回帰日数	12日
観測機器	SAR-C (Cバンド)
観測波長	5.55~5.65 cm
照射角	約39.3°
方位角	約-167.1°

3.1.3 InSAR 解析について

InSAR 解析は, 前述した SAR によって得られるデータを 2 つ (または複数) 用いて, それらのデータを干渉させ, データ間の反射波の位相差から地表変位を検出する解析手法である. 地表変位が無い場合, 干渉させた SAR データ間に位相差は生じない. しかし, 地表変位があれば, SAR 搭載衛星から地表までの距離が変化するため, 位相差が生じる. その為, InSAR 解析に用いたデータの観測期間における位相差を求めることで, 地表変位を把握することができる. InSAR 解析の概略図を Fig. 3-4 に示す.

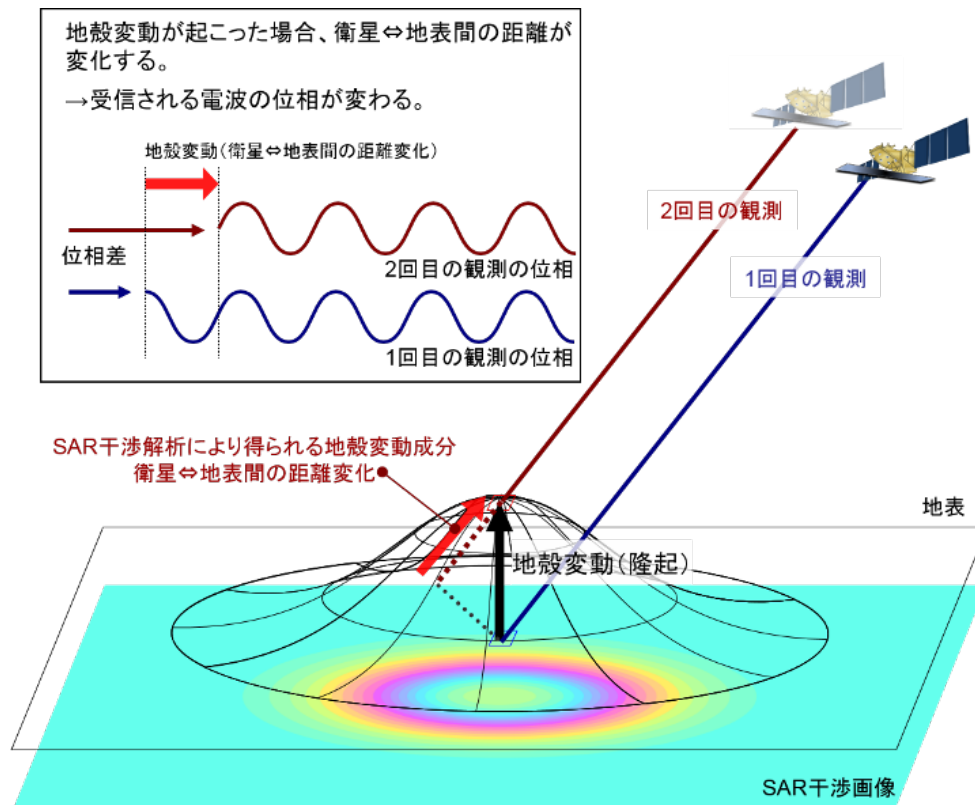


Fig. 3-4 InSAR 解析による地表面変位検出の概略図 (国土地理院)

https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html

InSAR 解析に関する概略は、上記の通りである。その具体的な理論について、まとめる。

SAR データは、観測画像として取得、運用される。画像を構成するそれぞれのピクセルが観測値の情報をもち、複素数で表される。位相を φ ($-\pi$ から $+\pi$)、振幅を A 、波長を λ とすると、観測値 C は以下の式で表される。

$$C = A \exp(i\varphi) \quad (3-1)$$

大気や地形などの様々なノイズにより生じる位相を φ_{scat} 、衛星から地表までの位相距離を R 、 $W[\]$ を Wrapping operator とすると、

$$\varphi = W \left[-\frac{4\pi}{\lambda} R + \varphi_{scat} \right] \quad (3-2)$$

で表される．（ただし，Wrapping operator とは，幅広い値を持つ位相情報を $-\pi$ から $+\pi$ に折り畳む処理ラップを表す関数である．）ここで，2 つの SAR データを干渉解析することを考える．解析の便宜上，2 つのデータをそれぞれ Master データ（以下，Master）と Slave データ（以下，Slave）と区別することとする．Master，Slave の位相は，上記（3-1），（3-2）より表され，その位相差 $\varphi_M - \varphi_S$ は，Master の観測値 C_M に Slave の観測値 C_S の共役複素数をかける干渉処理によって求めることができ，前述の φ_{scat} を Master データ，Slave データそれぞれで φ_{M-scat} ， φ_{S-scat} とすると，

$$I = C_M C_S^* = A_M A_S \exp \{ i (\phi_M - \phi_S) \} \quad (3-3)$$

$$\varphi_M - \varphi_S = W \left[-\frac{4\pi}{\lambda} (R_M - R_S) + \varphi_{M-scat} - \varphi_{S-scat} \right] \quad (3-4)$$

で表される．ここで， $\varphi_{M-scat} = \varphi_{S-scat}$ のとき，

$$\varphi_M - \varphi_S = W \left[-\frac{4\pi}{\lambda} (R_M - R_S) \right] \quad (3-5)$$

と表される．従って，Master と Slave の衛星から地表までの距離差 ΔR （地表変位量）は， $-\pi$ から $+\pi$ までの位相差 $\Delta\varphi$ と波長 λ で表すと，

$$\Delta R = R_M - R_S = -\frac{\lambda}{4\pi} (\varphi_M - \varphi_S) = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi \quad (3-6)$$

となる．しかし，上記のように， $\varphi_{M-scat} = \varphi_{S-scat}$ となることはない．これは，2 度目の観測時の衛星軌道が 1 度目のそれと完全に同一ではないため生じる位相差 φ_{orb} や，地形に起因する位相差 φ_{topo} ，大気の影響による伝播遅延による位相差 φ_{atm} ，その他のノイズ φ_{noise} が φ_{M-scat} ， φ_{S-scat} に含まれているためである．そのため，初期干渉位相 $\Delta\varphi$ は，地表面変位量を φ_{disp} とすると，

$$\Delta\varphi = \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \varphi_{disp} + \varphi_{noise} \quad (3-7)$$

で表され、この初期位相差から地表面変位量 φ_{disp} のみを取り出す各種補正が必要となる。この各種補正については、後述の 3.1.4 の InSAR 解析フローで述べる。

3.1.4 InSAR 解析フロー

InSAR 解析のフローを Fig. 3-5 に示す。本研究の解析には、防災科学技術研究所の小澤拓氏が開発した RINC（Rader Interferometry Calculation tool）を用いた。

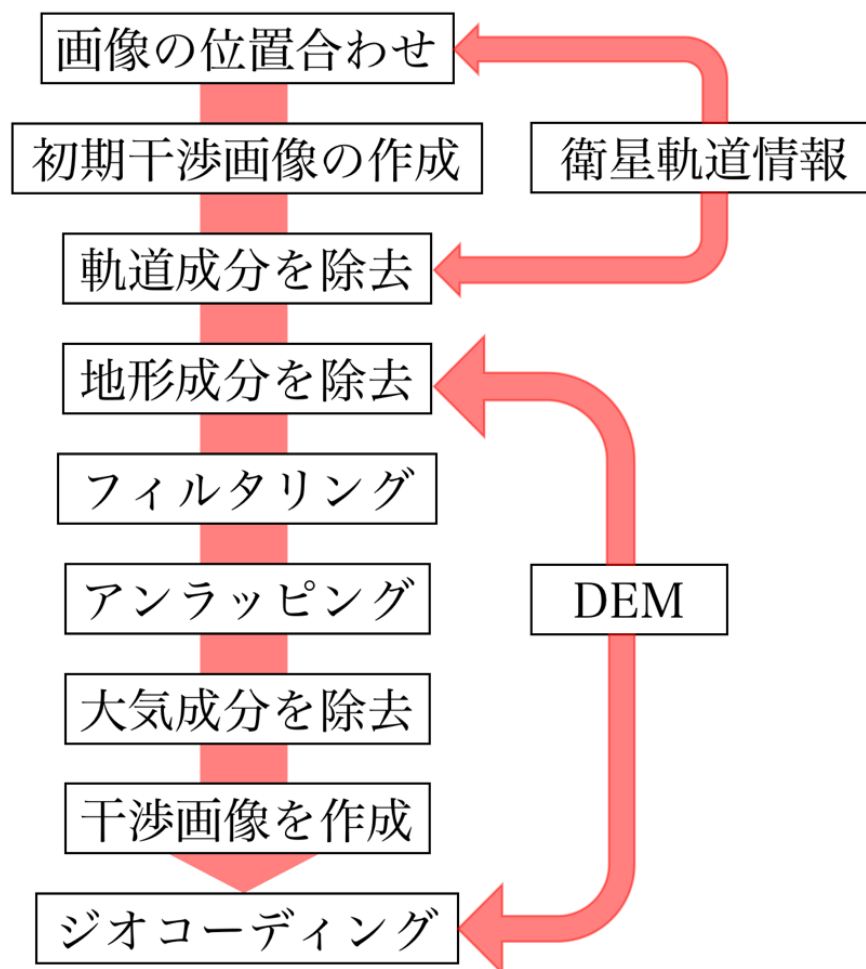


Fig.3-5 InSAR 解析フロー

InSAR 解析では、3.1.3 で述べたような初期干渉の前処理として、Master と Slave の位置合わせを行う必要がある。SAR を搭載する衛星はほぼ同一軌道上を通り、ほぼ同一地域を観測することができるが、観測結果をピクセルレベル（約 10 m 平方）で一致させることは難しい。そのため、解析の初期段階で、干渉解析する画像間の各ピクセルを対応付け（位置合わせ）する必要がある、この作業が「画像の位置合わせ」にあたる。

画像間の位置合わせを行うと、前述のように、ピクセル毎に共役複素数をかける干渉処理を実施し、初期干渉画像を作成することができる。この作業が「初期干渉画像の作成」である。しかし、この初期干渉画像を作成する際に解析した位相差は、3.1.3 で述べたように、4種類の位相成分とその他のノイズ φ_{noise} からなるため、それぞれの位相量を求め、初期位相から差し引くことで、地表面変位成分 φ_{disp} のみを残す補正を行う。

「軌道、地形成分の除去」は、先に示した4種類の位相成分の内、軌道成分 φ_{orb} 、地形成分 φ_{topo} を取り除く作業である。軌道成分は、(3-8)のように表される。ここで、 B は衛星位置の差（基線長）、 B_{\parallel} は B の照射方向成分、 B_{\perp} は照射方向の直交成分、 λ はマイクロ波の波長を表し、 θ 、 α はそれぞれ Fig. 3-6 に示す角度を表す。

$$\Delta\varphi_{orb} = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} = -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \alpha) \quad (3-8)$$

また、地形成分 φ_{topo} は、以下(3-9)のように表される。地形成分は、上述の B_{\perp} が既知であれば、デジタル標高データ（以下、DEM）によって取り除くことができる。(3-9)において、 h は、あるピクセルの楕円体高であり、 ρ は伝播経路の長さを表し、 i は、Fig. 3-6 に示すような角度を表す。なお、DEMは、国土地理院の10 m メッシュ標高モデルを用いた。

$$\varphi_{topo} = \frac{4\pi h}{\lambda\rho\sin i}B_{\perp} = \frac{4\pi h}{\lambda\rho\sin i}B\cos(\theta - \alpha) \quad (3-9)$$

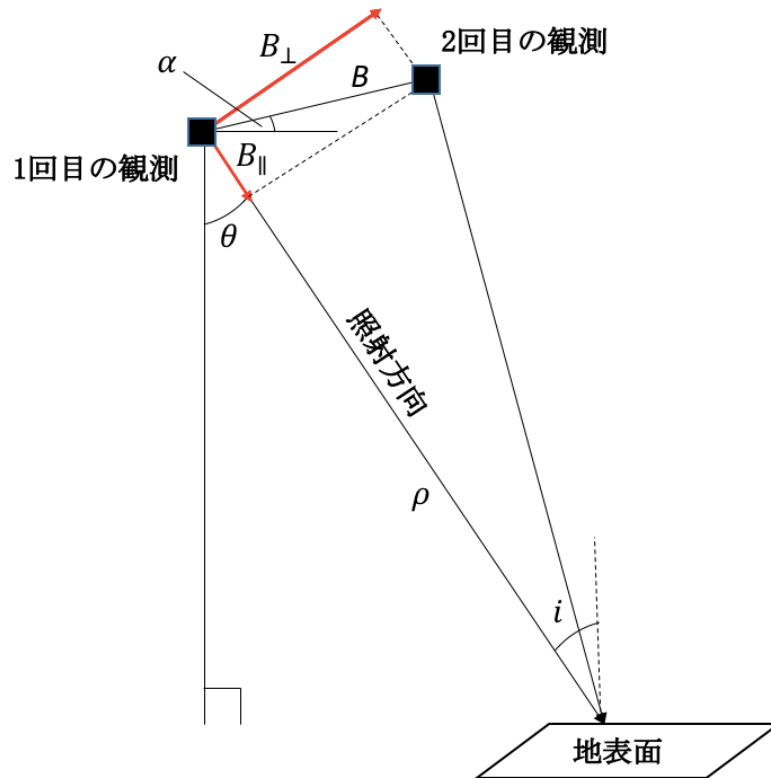


Fig. 3-6 InSAR 解析における観測ジオメトリ

「フィルタリング」は、先に示した φ_{noise} を取り除く作業である。これは、地表面被覆の状況変化により生じる。特に、植生の影響が大きい位相成分である。画像の周波数領域でノイズ除去を行う Adaptive フィルタ (Goldstein and Werner, 1998) などの RINC 標準搭載のフィルタを用いた。

「アンラッピング」は、InSAR 解析から得られた位相差を絶対値化する作業である。InSAR 解析から得られた位相差は、 $-\pi$ から $+\pi$ で表されており (ラップ), これを元に戻すことで (ラップ), 位相の絶対値化を行う。本研究では、アンラッピング処理ソフトウェアとして、RINC 標準搭載の SNAPHU (Chen and Zebker, 2002) を用いた。このソフトウェアでは、全ピクセルの平均地表変位量を基準とし、アンラッピング処理を行う。本研究では、アンラッピング処理後、神津島に設置されている電子基準点が示す設置点の地表変位量と一致するように絶対値を決定した。電子基準点については、詳細を 3.2.3 にて述べる。

「大気成分の除去」は、先に示した φ_{atm} を取り除く作業である。SAR から照射された電波の伝播経路は、大気中の水蒸気などの影響を受ける。特に、日本のように海に囲まれた高温多湿地域では、その影響は大きい。そのため、大気による伝播経路の誤差を

除去する必要がある。しかし、これを除去する方法は、まだ確立されておらず、いくつかの除去方法が提案されている。本研究では、標高（地形）と関連づけて成分を除去する補正法と、気象情報を用いて成分を除去する補正法を用いた。本研究では、それぞれを地形相関補正法、気象モデル補正法と呼ぶことにする。

地形相関補正法は、解析領域に均一な水蒸気が分布していると仮定する補正法である。均一な水蒸気分布による電波の伝播遅延は、地形に相関のある位相成分と考えられるため、最小二乗法を用いて、標高と相関のある残差位相を推定し、初期位相より差し引く（藤原ほか、1999）。ただし、均一な大気状況は、解析領域の規模に比例して、適用が困難になると考えられる。本研究の研究対象である神津島は、面積が 20 km^2 程度であるため、十分適用可能と考えられるが、均一な大気状況を仮定していることに注意が必要であることは変わらない。

気象モデル補正法は、数値気象モデルを用いて、大気遅延量を推定し、初期位相より差し引く。ただし、使用可能な数値気象モデルは、3 時間毎の約 10 km メッシュのデータであるため、解析領域が神津島のような比較的小規模である場合には、注意が必要である。なお、本研究では、数値気象モデルとして、気象庁の気象データ（MSM）を用いた。

本研究では、上記 2 つの大気成分の補正法を解析結果毎に使い分けた。判断の基準は、後述する電子基準点データとの比較である。詳しくは、3.2.3 で述べることとする。

このように、Fig. 3-5 に示す一連の解析を行い、干渉画像を作成する。干渉画像作成後、「ジオコーディング」を実施する。InSAR 解析に用いる SAR データは、レーダ座標系のデータであるため、解析結果を解釈しやすい地理座標系への変換を実施する。この座標変換では、レーダ座標を地理座標に対応づけるために、地理座標系のデータである DEM を用いた。

3.2 InSAR 解析結果の妥当性検討方法

本研究では、InSAR 解析結果の妥当性を評価するにあたり、「干渉度の検討」、「電波遅延補正による位相変化量に関する検討」、「電子基準点データとの比較検討」、「異なる SAR データの InSAR 解析結果比較検討」を行った。

3.2.1 干渉性の検討

InSAR 解析は、前述のように、2 つのデータを干渉解析し、地表変位を捉える技術である。そのため、1 度目と 2 度目の観測で、地表の散乱特性が類似している必要があり（小林ほか、2011）、この類似の度合いを干渉性（もしくは干渉度）と呼ぶ。1 度目と 2 度目の観測で地表の状態が大きく変化すれば、データ間の干渉解析を精度良く行えず、

干渉解析した結果の妥当性は低くなると考えられる。干渉性が著しく低下した領域は、隣り合ったピクセル同士の変位量が異なり、連続性を失うことから、砂目模様の解析結果となる。そこで、本研究では、InSAR 解析結果の干渉性を解析結果毎に検討した。

干渉性があまりに低いと考えられる解析結果の場合は、再解析を行い、ある程度干渉性の良い解析結果を本研究では採用することとした。干渉性は、特に、土地被覆変化と関係があるといわれている。たとえば、建設・国土防災分野における InSAR の実利用化に関する調査研究（日本リモートセンシング学会，2013）。これは、SAR から照射された電波の大部分が、地表面に届く前に、植生などで反射してしまうことがあるためである。ただし、植生などを電波が透過できる波長の長い電波を照射することで、大きく改善出来る。ALOS-2 に搭載された SAR（以下、PALSAR-2）は、波長が長い L バンド（波長約 23.84 cm）の電波を照射する。本研究において、解析の大部分は PALSAR-2 の SAR データを用いるため、干渉性が著しく低い解析結果となることは考えにくい。解析上の不備等から、通常ではありえない解析結果などがあった場合、その発見につながる可能性があるため、解析結果の妥当性検討に用いた。

本研究では、相関度もしくは、位相分散により、干渉性（干渉度）を評価することとした。相関度とは、干渉解析する対応づけられたピクセル間の後方散乱強度の相関係数であり、上述のように、干渉解析するデータ同士の地表面の状態に大きな差があれば、相関度は低下し、干渉性の低い解析結果であることを示す。また、位相分散とは、画像中の各点における周囲とのばらつき具合（≒ノイズの多さ）を計算したものであり、上述のような砂目模様のピクセル群が多くを占める解析結果の場合、位相分散は悪くなり、干渉性の低い解析結果であることを示す。InSAR 解析結果において、全ピクセルの相関度が極めて高い場合は、位相分散においても非常に良い干渉性を示す。そのため、相関度のみを確認することで、干渉性を評価できるはずである。しかし、各種補正を実施した InSAR 解析結果においては、複数のピクセルを平均化（マルチルック）処理等しているため、上記のような相関度によって干渉性を評価することは難しい。そのため、各種補正を実施した InSAR 解析結果においては、位相分散画像を作成し、干渉性を評価することとした。なお、いずれも 0 から 1.0 の値で計算され、本研究では、0.7 以上を干渉性が高い解析結果と評価した。

3.2.2 伝播遅延補正に関する検討

InSAR 解析では、上述のように、水蒸気による伝播遅延による影響を補正する方法が確立されておらず、本研究における解析の多くは、地形相関補正法を採用している。この補正法は、地形と相関のある残差位相を推定し、初期位相から差し引いているため、初期位相に水蒸気による伝播遅延が含まれていない場合、補正した結果に地形と相関の

ある位相分布が表れることになる。後述する第4章の解析結果を見ると、目立った地表変位が見られる解析結果には、地形に 관련된変位が表れているようにみえるものがある。火山においては、地形に 관련된ある地表変位がみられることは特別不自然では無い。しかし、この補正によって、本来は存在しない地表変位を解析結果として採用してしまう可能性は否定できない。そのため、本研究では、地形相关補正によって初期の干涉画像には存在しない、地形に 관련된位相分布が現れていないか検討を行った。

3.2.3 電子基準点データとの比較検討

本研究では、InSAR 解析結果の妥当性を客観的に検討する指標として、国土地理院及び気象庁の電子基準点データとの比較検討を行った。研究対象の神津島には、Fig. 3-7 に示す2箇所に利用可能な電子基準点（神津島 1A、神津島 2）がある。この2点のうち、神津島 1A は、前述のアンラッピングで地表変位の絶対値化に用いる。そのため、神津島 2 が設置されている地点の変位量を InSAR 解析結果と電子基準点データで比較検討した。電子基準点から得られる地表変位を真値と仮定し、InSAR 解析結果における変位を真値と比較した。真値と比較して、著しく整合性のとれていない解析結果については、再解析を実施することで、InSAR 解析の精度を向上させることを試みた。なお、再解析では、抽出点によって解析結果が大きく異なる伝播遅延補正を繰り返し実施した。



Fig. 3-7 電子基準点設置位置（地理院地図）

3.2.4 異なる SAR データの InSAR 解析結果比較検討

本研究では、InSAR 解析による地表変位把握を実施するにあたり、ALOS-2 の SAR データを主に利用した。一方、ALOS-2 同様に、SAR 搭載衛星は世界中で多く運用されており、その中でも、上述の Sentinel-1A の SAR データは、無償かつ誰でも利用可能である。そのため、本研究における InSAR 解析結果の妥当性検討として、Sentinel-1A の SAR データを InSAR 解析し、その結果を比較検討した。ただし、本研究で比較した解析結果は全解析結果全てではなく、1 ペア（ある 1 期間）のみである。本来、Sentinel-1A の SAR データと、それを InSAR 解析することが可能な解析ソフト GMTSAR (Generic Mapping Tools SAR) が共に無償で利用出来ることから、全ての解析結果 (ALOS-2) で比較検討することが望ましい。しかし、本研究では、比較対象となる両解析の解析環境・過程を同様にすることを優先した。前述のように、本研究では、ALOS-2 の SAR データを InSAR 解析ソフト RINC を用いて解析しており、RINC を用いて Sentinel-1A の SAR データを解析する場合、必要なフォーマット変換などを実施しなければならず、時間などの制約上、全ての解析結果についてそれらを実施することはかなわなかった。

3.3 逆解析による圧力源推定

火山の地表変位は、火山内部のマグマだまりの位置もしくは体積の変化や、熱水の増圧、マグマ輸送などに伴うことが多い。これは、たとえば、周囲の岩盤がマグマや非常に高温な熱水によって押し上げられ、地表が隆起するためである。

上記のような理由から、地表変位の情報から、地下の圧力源の位置や形状、体積変化を推定する研究が発展してきた。本研究においても、InSAR 解析により明らかになった神津島の地表変位を用いて、地下の圧力源の位置、体積変化量を推定する逆解析を試みた。なお、推定する圧力源の形状は、球状圧力源とし、逆解析のアルゴリズムには、焼きなまし法を採用した。

3.3.1 推定モデル

本研究では、数多く考えられる圧力源モデルの中から、推定が最も簡便な球状モデルを採用し、今後の神津島圧力源推定の足がかりにすることとした。

球状モデルは、茂木モデル (Mogi, 1958) と呼ばれる理論式から圧力源を推定する。この茂木モデルは、地表を平面、地盤を半無限弾性体と仮定し、圧力源と地表変位点間の距離、体積変化量から、圧力源の位置、体積変化量を推定する。(3-10), (3-11) に関係式を示す。

$$\Delta r = \frac{(1 - \nu)\Delta V}{\pi} \frac{r}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (3-10)$$

$$\Delta h = \frac{(1 - \nu)\Delta V}{\pi} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (3-11)$$

(3-10) , (3-11) において, D は圧力源深さ, ΔV は体積変化量, r は圧力源からの水平面距離, ν はポアソン比を表す. (3-10) , (3-11) によって算出された Δr , Δh はそれぞれ水平方向, 上下方向の地表変位量であり, 求まった Δr , Δh を LOS 方向の地表変位量に変換し, InSAR 解析結果との誤差を計算する. 本研究の逆解析では, InSAR 解析により得られた地表変位量を LOS_{InSAR} , (3-10) , (3-11) を用いて推定した圧力源モデルより算出した地表変位量を LOS_{cal} , 誤差を E とした以下 (3-12) 式のような誤差関数により誤差を算出し, 求まる誤差が可能な限り小さくなるような最適値パラメータを探索した. なお, 本研究における最適値パラメータは, 圧力源の位置及び体積変化量である.

$$E = (LOS_{InSAR} - LOS_{cal})^2 \quad (3-12)$$

3.3.2 アルゴリズム

本研究は, 解探索アルゴリズムとして, 焼きなまし法を採用した. 焼きなまし法とは, 最適化問題における解探索アルゴリズムの 1 つであり, 大域的な最適解を探索することに長けた特徴を持つ. たとえば, 誤差を小さくする方向に探索を進めていくアルゴリズムの場合, 与える初期値によっては, 局所的な最適解に陥り, たとえ解析回数を増やしたとしても, 大域的な最適解を求めることは困難である. これは, Fig. 3-8 の概念図を見ると理解しやすい. 上述のような, 誤差を小さくする方向に探索を進めるアルゴリズムの場合, 初期値を P1 や P2 の位置に与えてしまうと, 誤差が大きくなる方向には探索が進まないため局所解に陥り, T1 や T2 を超えて, さらに誤差の小さい大域解を見つけることが出来ない. そのため, 最適解を見つけるために初期値を P3 のような位置に与えなければならないが, たとえ解析回数を増やしたとしても, P3 のような点に初期値を設定できる確証は無い. 一方, 焼きなまし法では, 常に誤差が小さくなる方向に探索を進めるだけでなく, “ある確率” に従い, 誤差が大きくなる方向にも探索を進める. そのため, 初期値に依存せず, T1 や T2 を超えて, 大域解を見つけることが出来る. ただし, この “ある確率” は, 解探索の初期段階では高く, 探索が進むにつれて, 低下す

る。これは、解探索の初期段階では、誤差が大きくとも確率的にその方向への探索が採択され、解探索の最終段階では、基本的に、誤差が小さくなる方向への探索のみ採択されていくことを意味する。Fig. 3-9 に、逆解析のフローを示す。

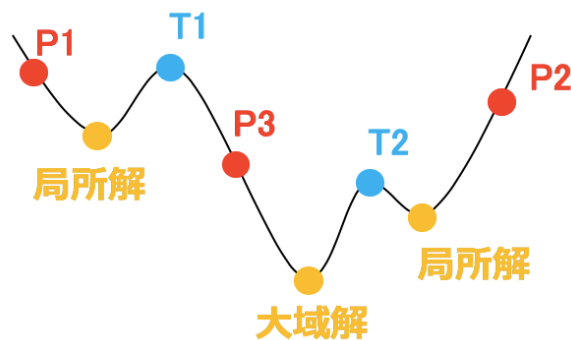


Fig.3-8 焼きなまし法の概念図

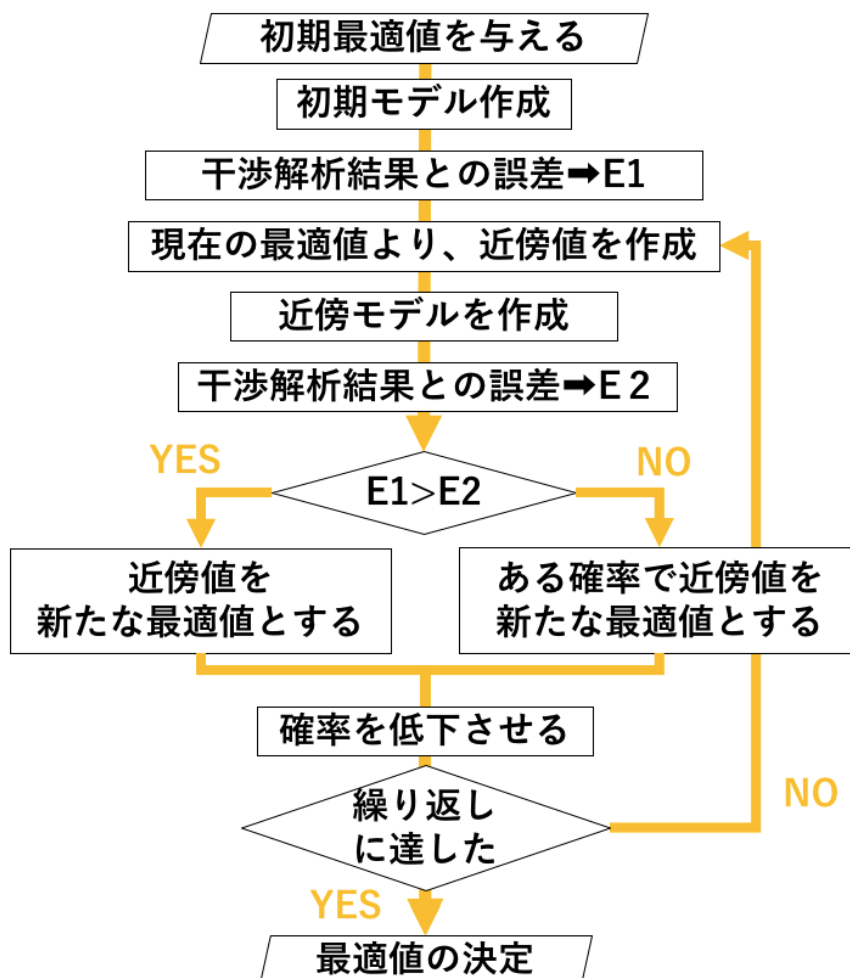


Fig. 3-9 逆解析のフロー

4. 神津島を対象とした InSAR 解析

4.1 利用データ

本研究では，前述の 2 種類の SAR データを用いる．すなわち，ALOS-2 と Sentinel-1A である．利用データの観測日時を Table 4-1 に示す．なお，ALOS-2 の SAR データは，PIXEL（PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface）で共有されている．また，上記 SAR データを取得した衛星の軌道と衛星視線方向を Fig.4-1 に示す．

Table 4-1 利用データ観測日時

衛星	ALOS-2		Sentinel-1A
軌道	Ascending	Descending	Descending
観測日時	20150710	20141204	20141207
	20160401	20151008	20151003
	20160708	20151231	
	20161209	20160407	
	20170317	20160519	
		20160630	
		20160908	
		20161201	
		20170323	
		20170629	
		20170907	
		20171130	
		20180125	
		20180208	
		20180503	
		20180628	
		20181129	

観測日時表記：YYYYMMDD

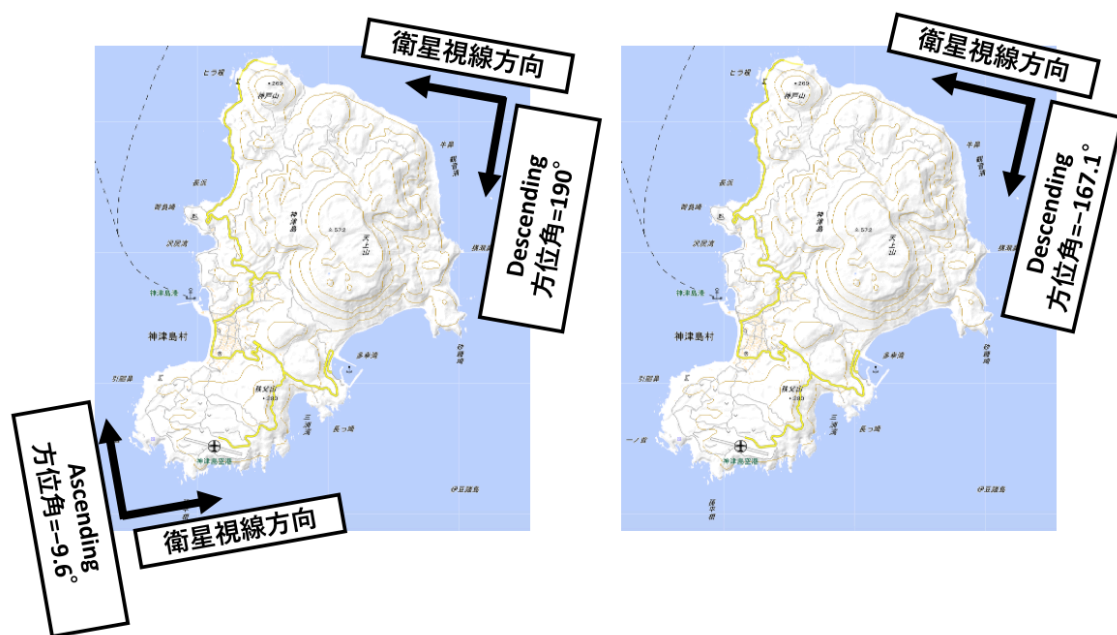


Fig. 4-1 左図：ALOS-2 の衛星軌道と衛星視線方向（Ascending, Descending），右図：Sentinel-1A の衛星軌道と衛星視線方向（Descending）

4.2 InSAR 解析結果

4.2.1 ALOS-2

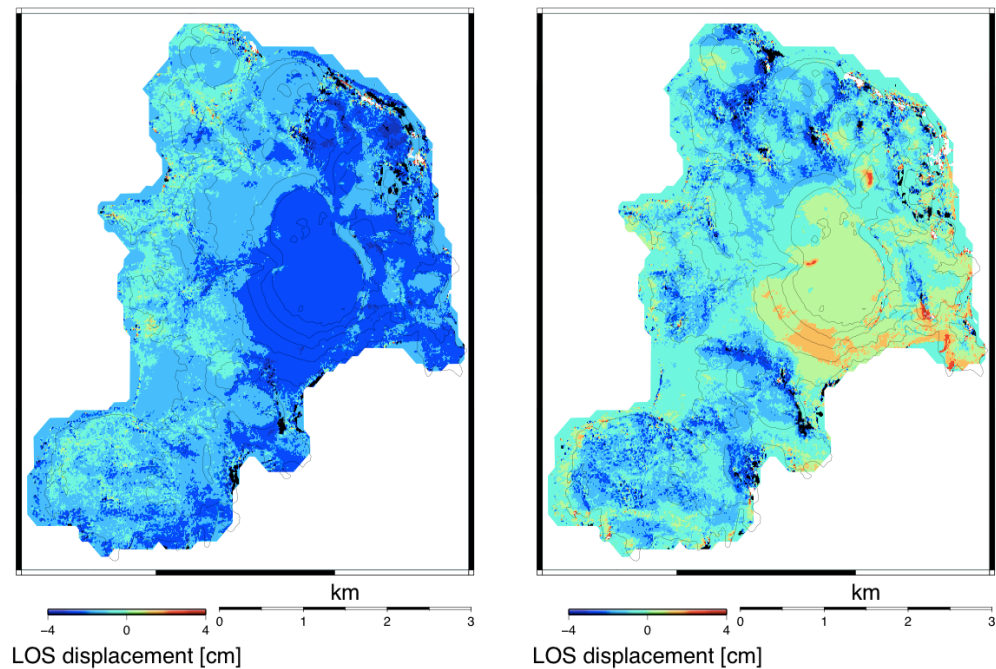
ALOS-2 によって、取得された SAR データを用いた InSAR 解析結果を Fig. 4-2 a から t に示す。なお、Fig. 4-2 a から d までは Ascending の InSAR 解析結果であり、Fig. 4-2 e から t までは Descending の InSAR 解析結果である。また、それぞれの解析結果に Table 4-2 に示すようなペア No.（たとえば、A-1）を与えた。

Table 4-2 InSAR 解析結果（ALOS-2）名称の一覧表

干渉ペアとは、InSAR 解析に用いた SAR データの観測日の組み合わせを表す

Ascending		Descending	
干渉ペア	ペアNo.	干渉ペア	ペアNo.
20150710_20160401	A-1	20141204_20151008	D-1
20160401_20160708	A-2	20151008_20151231	D-2
20160708_20161209	A-3	20151231_20160407	D-3
20161209_20170317	A-4	20160407_20160519	D-4
		20160519_20160630	D-5
		20160630_20160908	D-6
		20160908_20161201	D-7
		20161201_20170323	D-8
		20170323_20170629	D-9
		20170629_20170907	D-10
		20170907_20171130	D-11
		20171130_20180125	D-12
		20180125_20180208	D-13
		20180208_20180503	D-14
		20180503_20180628	D-15
		20180628_20181129	D-16

A 20150710_20160401 266days A 20160401_20160708 98days



(a) A-1

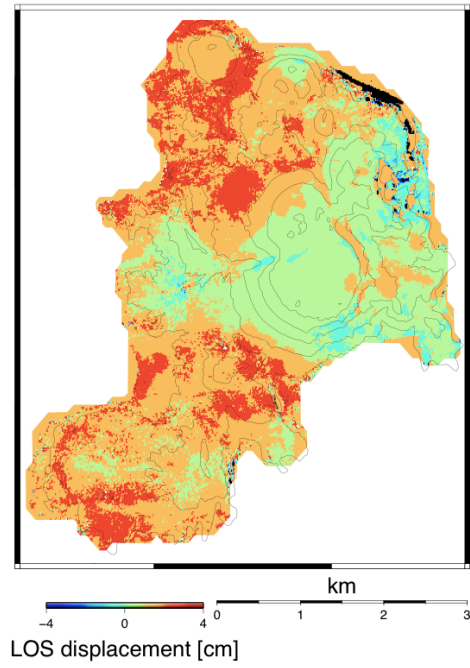
(b) A-2

頭上部の頭文字は、A が Ascending、D は Descending を意味する。頭文字に続く 8 桁の数字の組み合わせは、干渉解析に使用したデータの日付を表し、続く 3 桁の数字はその期間を表す。カラーバーは、地表変位を最小 -4 cm から最大 $+4\text{ cm}$ で表す。符号は、+ が衛星視線方向に近づく変位、- は遠ざかる方向の変位を意味する。

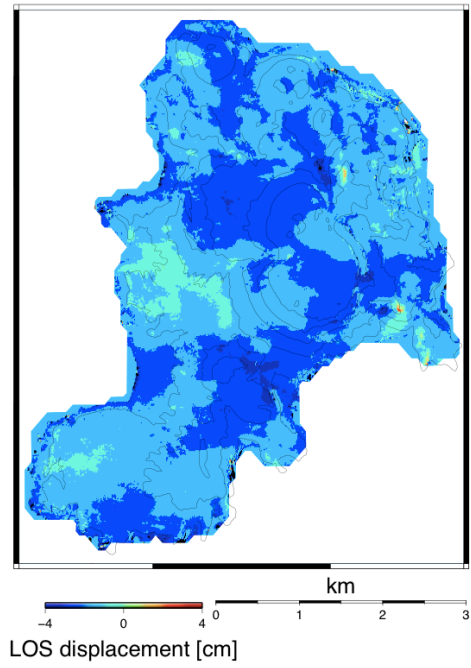
上記内容を Fig. 4-2 a を例に示すと、同図は、2015 年 7 月 10 日と 2016 年 4 月 1 日の SAR データ(Ascending)を干渉解析した結果であり、その期間は、266 日間である。地表変位は、全体的に衛星から遠ざかる方向であることを示す。

同様の記述方法で、その他の InSAR 解析結果を以下に示す。

A 20160708_20161209 154days A 20161209_20170317 98days

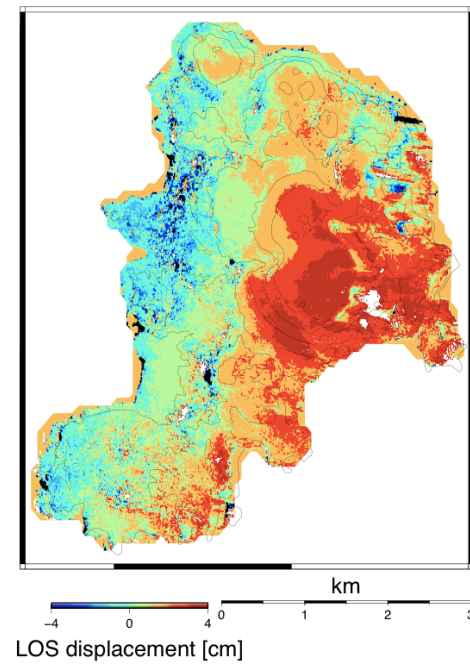


(c) A-3

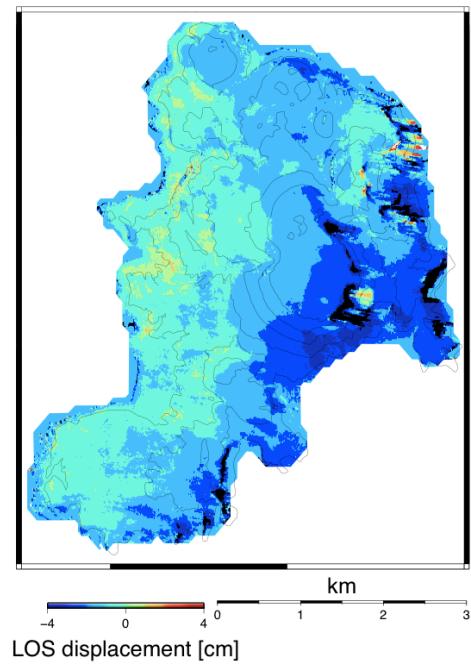


(d) A-4

D 20141204_20151008 308days D 20151008_20151231 84days

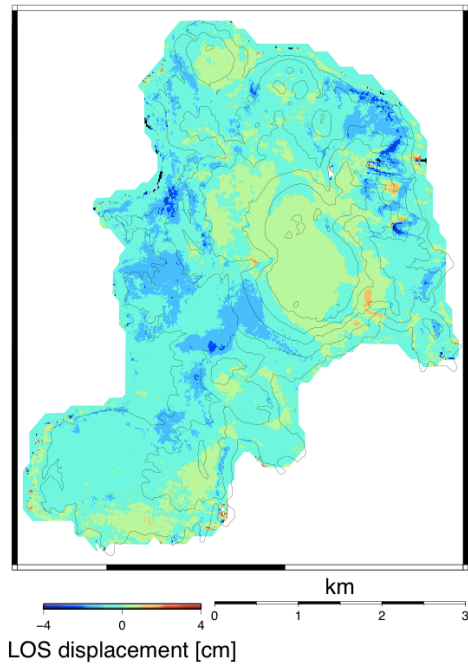


(e) D-1



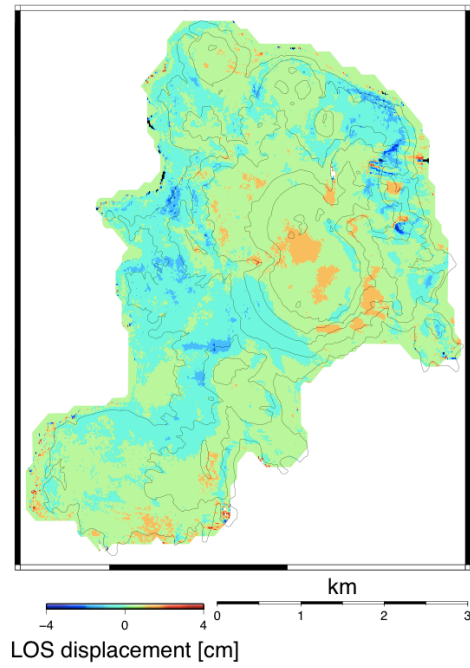
(f) D-2

D 20151231_20160407 98days



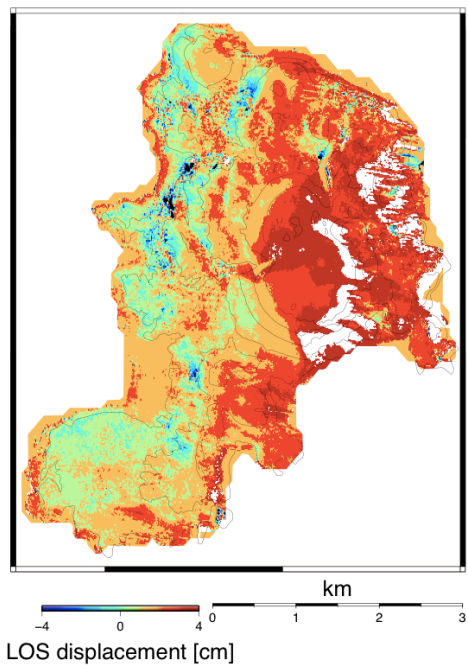
(g) D-3

D 20160407_20160519 42days



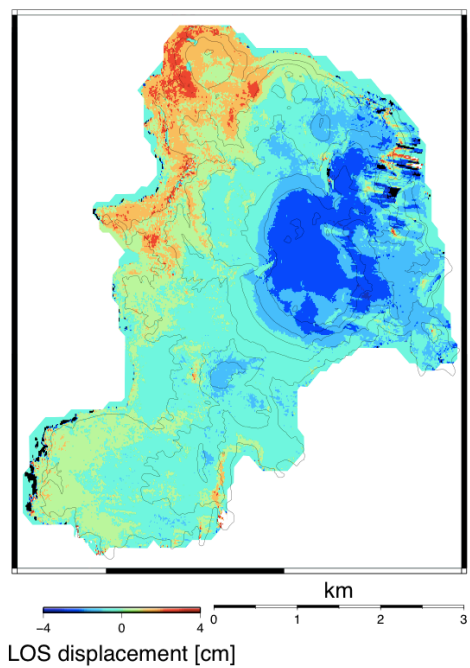
(h) D-4

D 20160519_20160630 42days



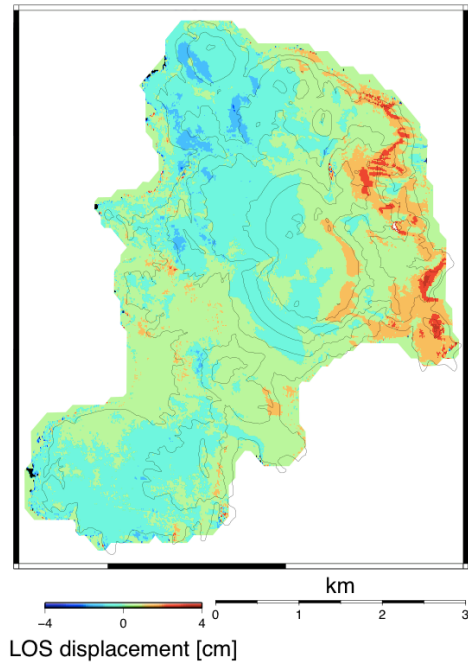
(i) D-5

D 20160630_20160908 70days

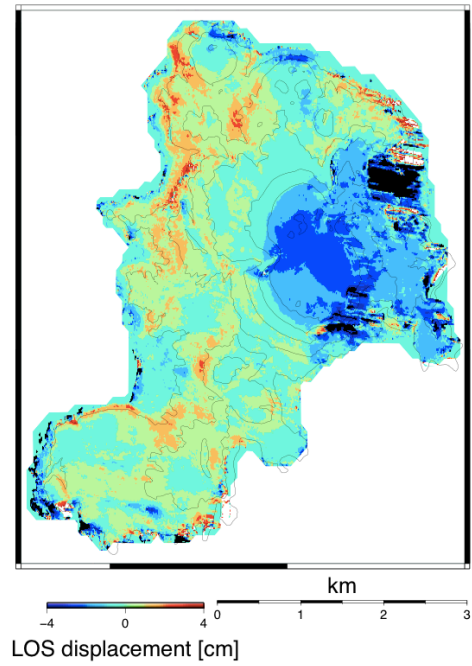


(j) D-6

D 20160908_20161201 84days D 20161201_20170323 112days

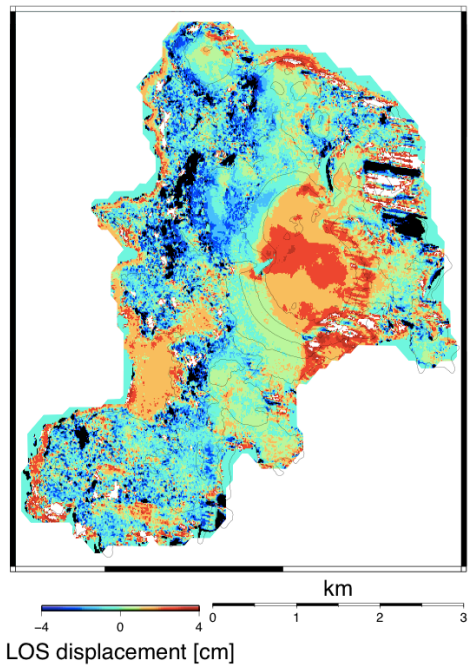


(k) D-7

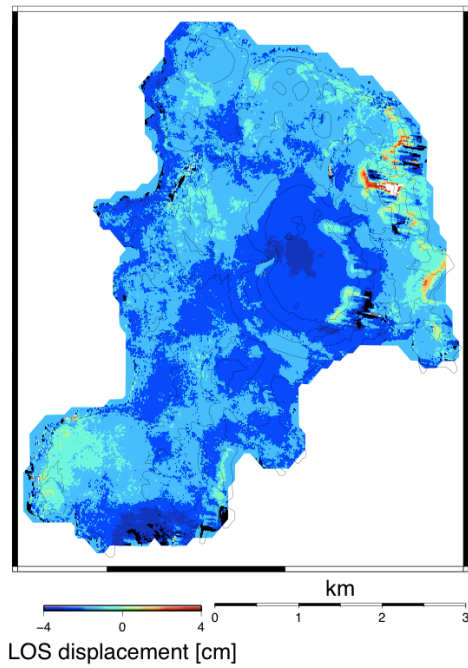


(l) D-8

D 20170323_20170629 98days D 20170629_20170907 70days

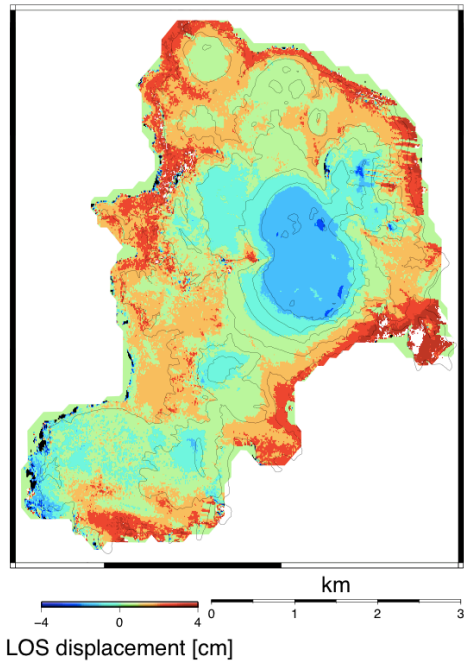


(m) D-9



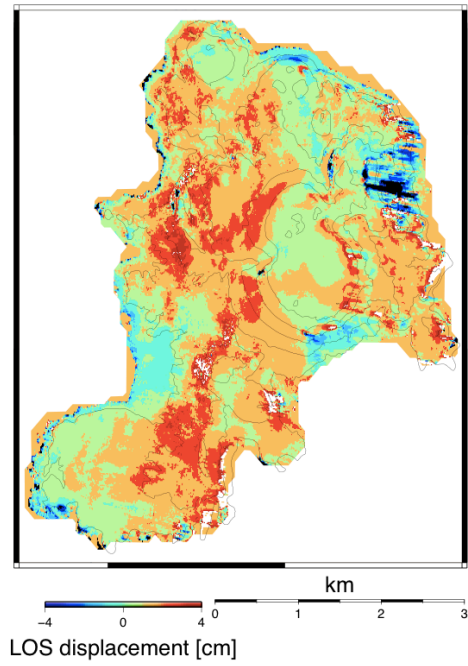
(n) D-10

D 20170907_20171130 84days



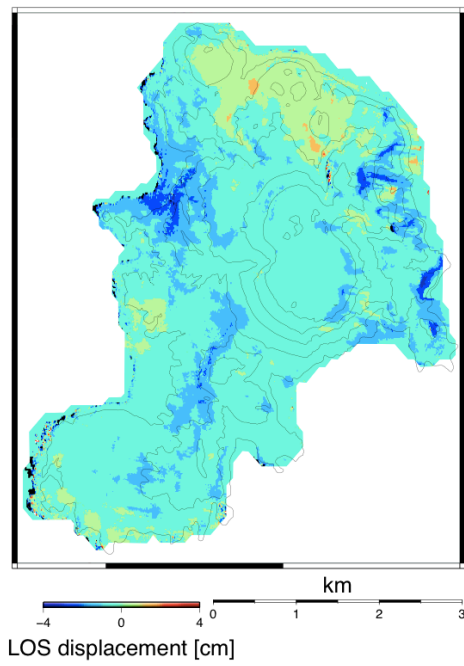
(o) D-11

D 20171130_20180125 56days



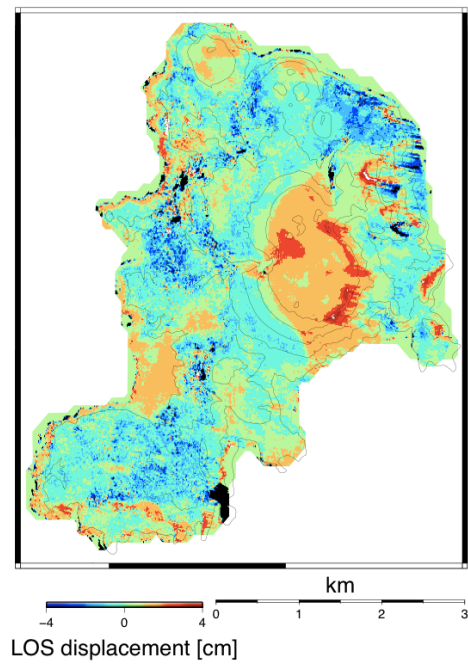
(p) D-12

D 20180125_20180208 14days



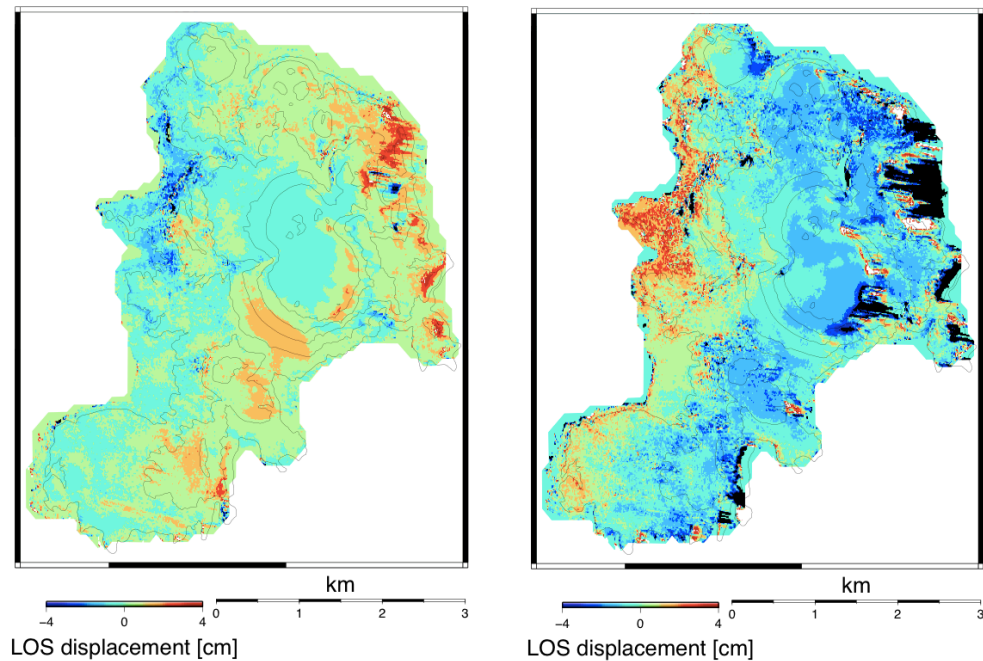
(q) D-13

D 20180208_20180503 84days



(r) D-14

D 20180503_20180628 56days D 20180628_20181129 154days



(s) D-15

(t) D-16

Fig. 4-2 InSAR 解析結果

解析結果 A-1 では、神津島全体が衛星から遠ざかる方向に変位している。特に、神津島東側で 3~4 cm 程度の比較的大きな変位が確認できる。

解析結果 A-2 では、神津島西側の一部の地域で衛星から遠ざかる方向に 1.0 cm 程度の地表変位が確認できるが、目立って大きな地表変位は神津島全体で確認できない。

解析結果 A-3 では、天上山に目立った地表変位は確認できず、その他の地域では、衛星に近く方向に 3~4 cm 程度の地表変位が確認できる。

また、解析結果 A-4 では解析結果 A-1 同様に、神津島全体で衛星から遠ざかる方向の地表変位が確認でき、大きいところでは 4 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-1 では、神津島東側で衛星視線方向に近づく地表変位が確認できる。特に、天上山周辺では 4 cm 程度の比較的大きな地表変位が確認できる。また、神津島西側の一部の地域において、衛星から遠ざかる方向に 3 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-2 では、神津島東側において衛星から遠ざかる方向に、3~4 cm 程度の地表変位が確認できるが、その他の地域では目立って大きな地表変位は確認できない。

解析結果 D-3, D-4 においては、神津島全体に目立った地表変位は確認できない。その他の地域と比較すると、天上山周辺で若干の地表変位が確認できるが、その大きさは 0~1 cm 程度である。

解析結果 D-5 では、衛星に近づく地表変位が神津島の大部分の地域で確認できる。特に、天上山周辺では衛星に近づく方向に 4 cm 程度の比較的大きな地表変位が確認できる。

解析結果 D-6 では、天上山周辺で衛星から遠ざかる方向に 4 cm 程度の地表変位が確認できる。その他の地域については、地表変位はほとんど確認できないが、神津島北西部において、衛星に近づく方向に 3~4 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-7 では、神津島のほとんどの地域で、目立って大きな地表変位は確認できない。

解析結果 D-8 では、天上山周辺で衛星から遠ざかる方向に 3~4 cm 程度の地表変位が確認できる。その他の地域では、目立って大きな地表変位は確認できない。

解析結果 D-9 では、天上山周辺で衛星に近づく方向に 3~4 cm 程度の地表変位が確認できる。また、神津島西側の大部分の地域において、衛星から遠ざかる方向に 2~4 cm 程度の地表変位が確認できる。ただし、市街地がある神津島北西部では衛星に近づく方向に 2 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-10 では、神津島全体で、衛星から遠ざかる方向に 2~4 cm 程度の地表変位が確認できる。特に、天上山周辺では衛星から遠ざかる方向に 4 cm 程度の比較的大きな地表変位が確認できる。

解析結果 D-11 では、天上山周辺で衛星から遠ざかる方向に 2~3 cm 程度の地表変位が確認できる。また、神津島北側の海岸線沿いでは、衛星に近づく方向に 4 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-12 では、神津島全体に衛星に近づく方向の地表変位が確認できる。特に、神津島西側の大部分の地域で衛星に近づく方向に 3~4 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-13 では、神津島において目立った地表変位は確認できないが、北西部の一部の地域に、衛星から遠ざかる方向に 2~3 cm 程度の地表変位が確認できる。

解析結果 D-14 では、天上山周辺で衛星に近づく方向に 3 cm 程度の地表変位が確認できる。その他の地域では、目立って大きな地表変位は確認できない。

解析結果 D-15 では、神津島において目立って大きな地表変位は確認できない。

解析結果 D-16 では、神津島全体において衛星から遠ざかる方向の地表変位が確認できる。地表変位の大きさは、0~2 cm 程度であり、天上山を含む神津島東側の地域で 2 cm 程度の地表変位が確認できる。

4.2.2 Sentinel-1A

Sentinel-1A によって、取得された SAR データを用いた InSAR 解析結果を Fig. 4-3 に示す。なお、図の記述方法は、ALOS-2 の InSAR 解析結果（Fig. 4-2）と同様である。

D 20141207_20151003 300days

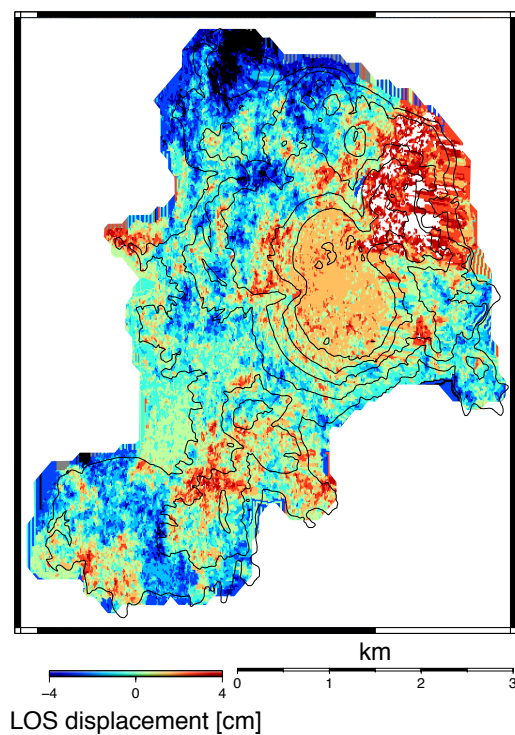


Fig. 4-3 InSAR 解析結果（Sentinel-1A）

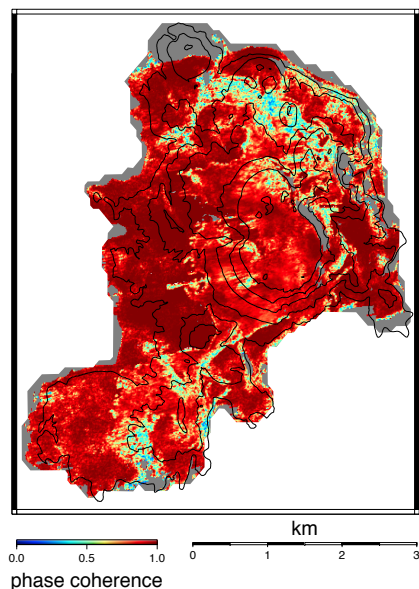
Fig. 4-3 の解析結果においては、天上山周辺で衛星に近づく方向に 2 cm 程度の地表変位が確認できる。また、天上山の北東部では衛星に近づく方向に 4 cm 程度の地表変位が確認できる。神津島の北側では、衛星から遠ざかる方向に 4 cm 程度の地表変位が確認できる。

5. InSAR 解析結果の妥当性に関する検討

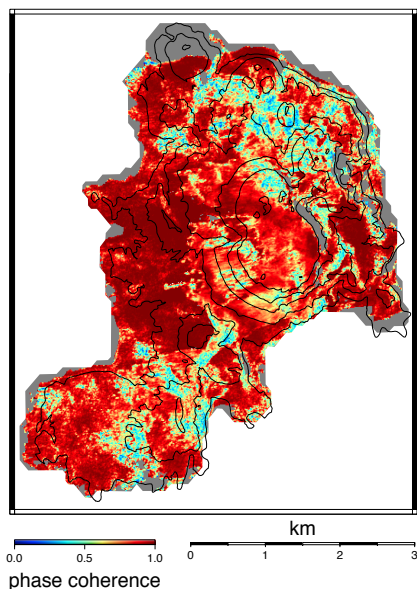
5.1 干渉性の検討

3.2.1 でも述べたように、InSAR 解析結果の干渉性が著しく低いものについては、再解析を繰り返し、解析領域全体の干渉性がある程度高くなったものを解析結果として採用した。以下に、4.2 で示した InSAR 解析結果の干渉性を検討するのに用いた画像を示す。図上部の記述内容は、4.2 の InSAR 解析結果と同様である。カラーバーは、干渉性を最も低い 0 から、最も高い 1.0 の値で表した。

A 20150710_20160401 266days A 20160401_20160708 98days

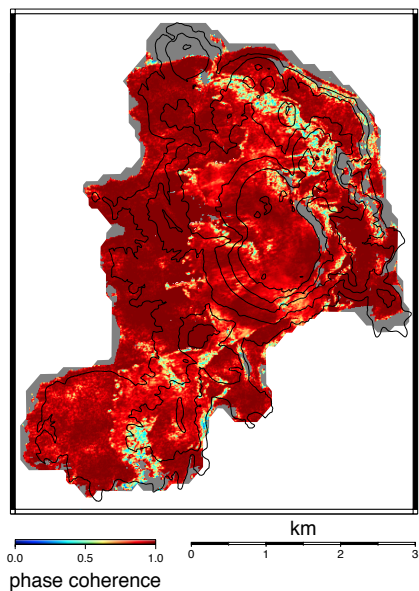


(a) A-1

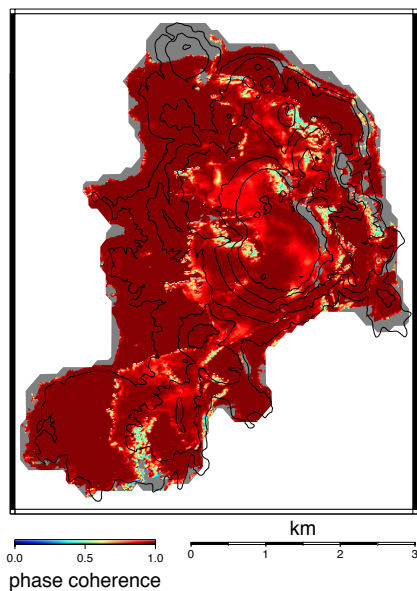


(b) A-2

A 20160708_20161209 154days A 20161209_20170317 98days

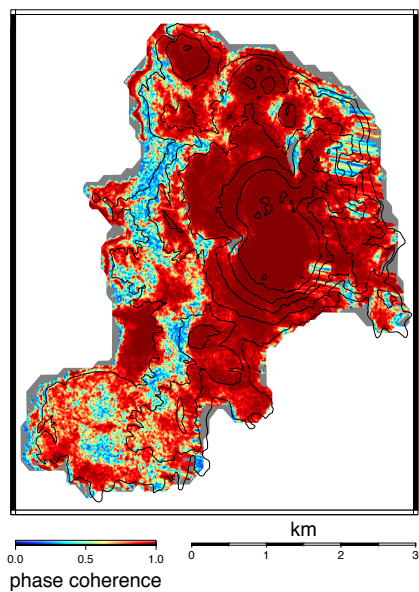


(c) A-3

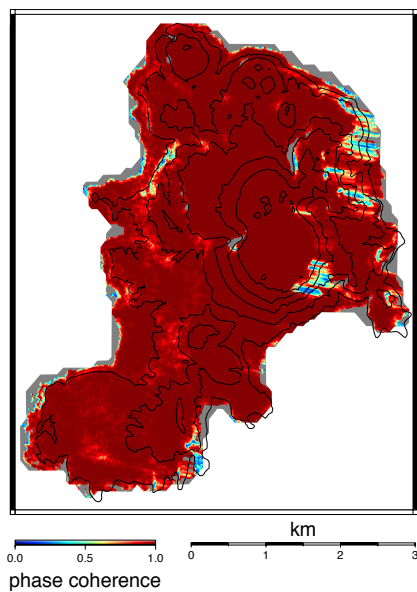


(d) A-4

D 20141204_20151008 308days D 20151008_20151231 84days

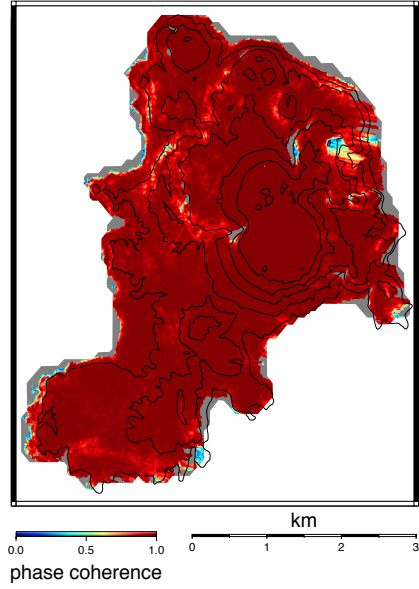


(e) D-1



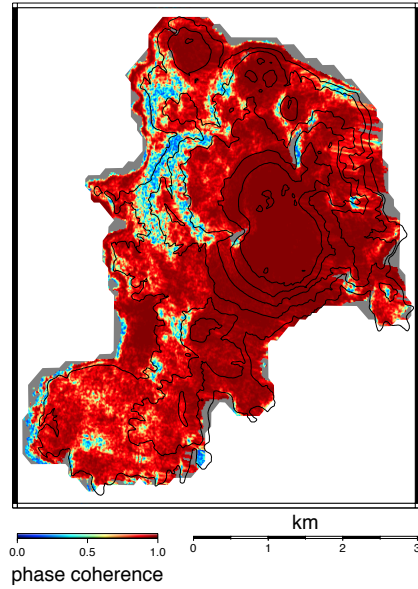
(f) D-2

D 20151231_20160407 98days



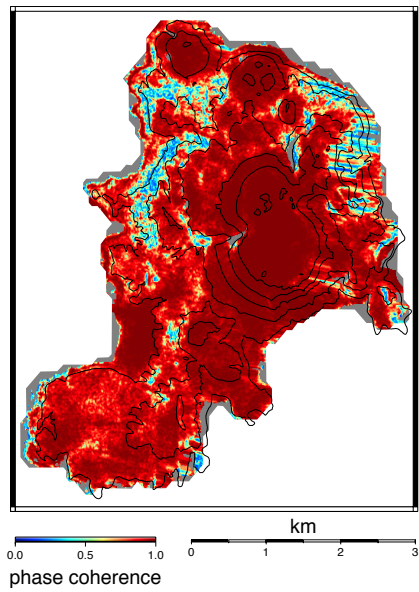
(g) D-3

D 20160407_20160519 42days



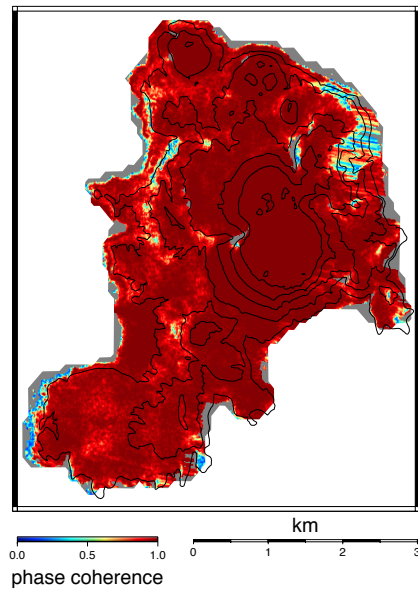
(h) D-4

D 20160519_20160630 42days



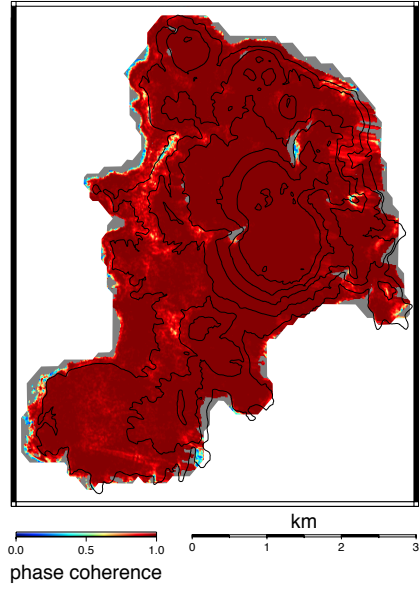
(i) D-5

D 20160630_20160908 70days

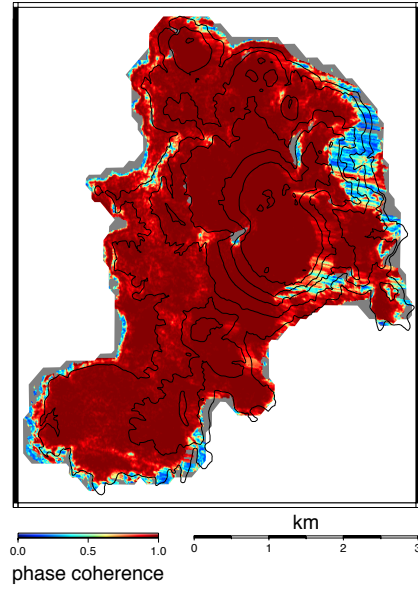


(j) D-6

D 20160908_20161201 84days D 20161201_20170323 112days

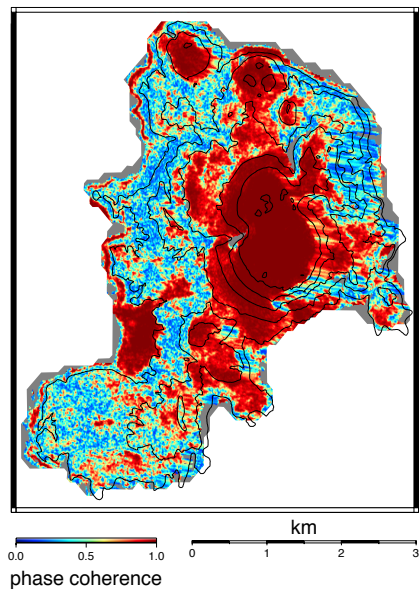


(k) D-7

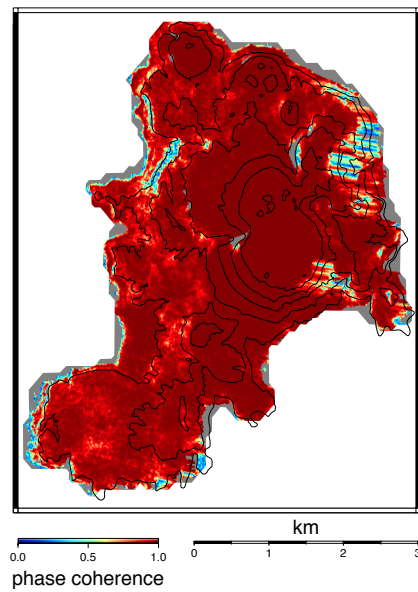


(l) D-8

D 20170323_20170629 98days D 20170629_20170907 70days

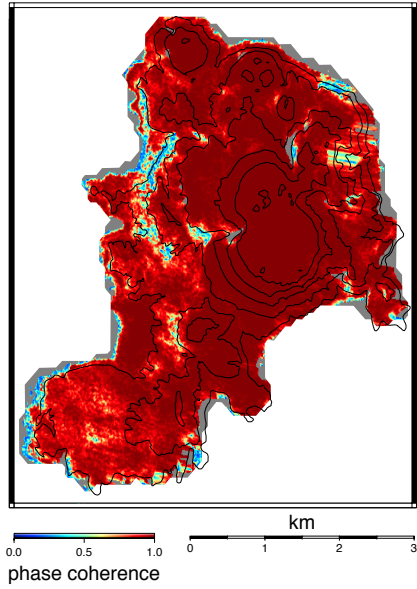


(m) D-9



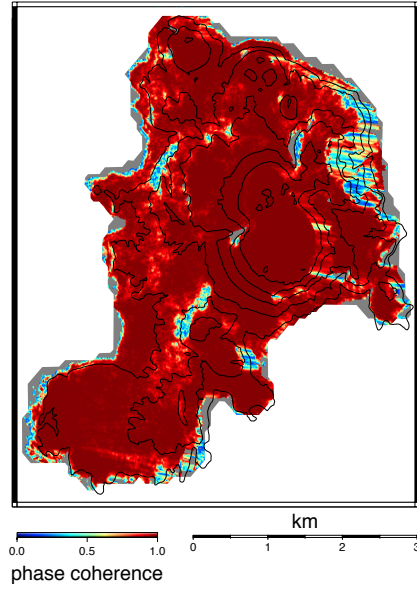
(n) D-10

D 20170907_20171130 84days



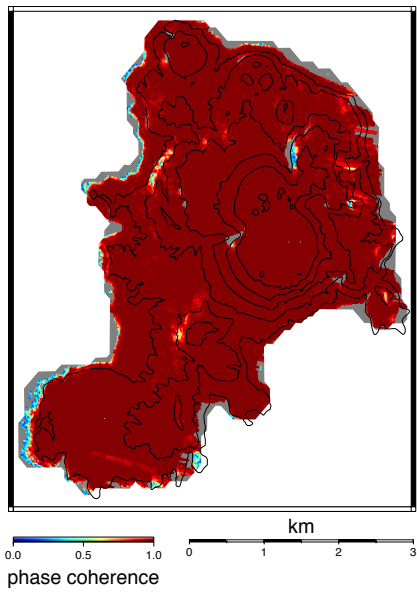
(o) D-11

D 20171130_20180125 56days



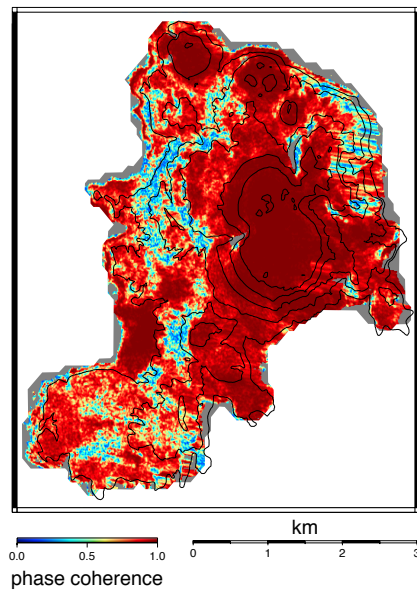
(p) D-12

D 20180125_20180208 14days



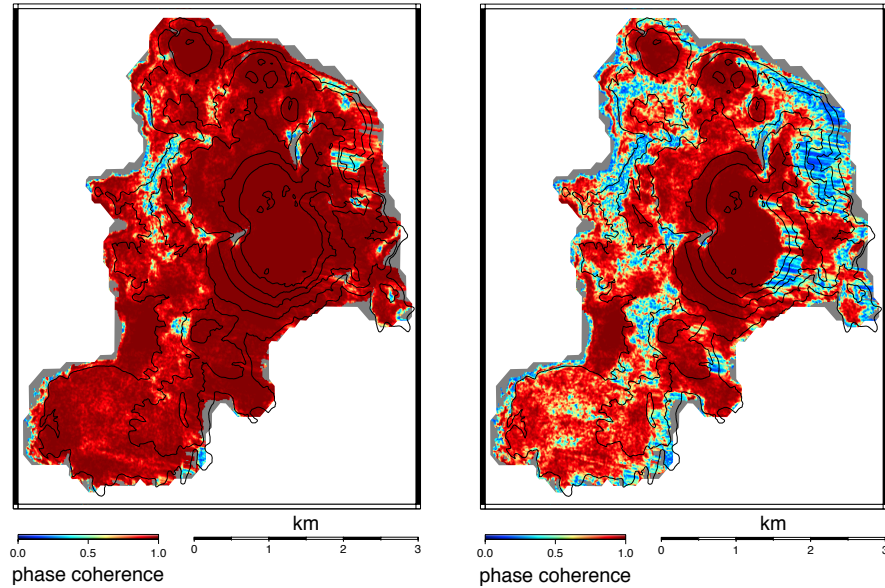
(q) D-13

D 20180208_20180503 84days



(r) D-14

D 20180503_20180628 56days D 20180628_20181129 154days



(s) D-15

(t) D-16

Fig. 5-1 InSAR 解析結果 (ALOS-2) D-1~16 の干渉性

D 20141207_20151003 300days

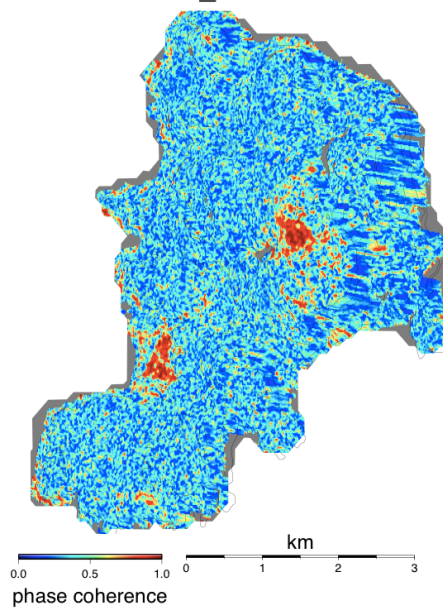


Fig. 5-2 InSAR 解析結果 (Sentinel-1A) の干渉性

上図 A-1 の干渉性を確認すると、神津島北部の一部の地域で、干渉度 0.5 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 A-1 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果だと判断した。

また、上図 A-2 の干渉性を確認すると、神津島北部及び南部の一部の地域で、干渉度 0.5 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.7 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 A-2 の InSAR 解析結果についても、妥当性のある解析結果だと判断した。

上図 A-3,4 の干渉性を確認すると、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 A-3,4 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-1 の干渉性を確認すると、神津島西部の一部の地域で、干渉度 0.3 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-1 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-2 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-2 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-3 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-3 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-4 の干渉性を確認すると、神津島北西部の一部の地域で、干渉度 0.3 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-4 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-5 の干渉性を確認すると、神津島北西部及び北東部の一部の地域で、干渉度 0.3 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-5 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-6 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-6 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-7,8 の干渉性を確認すると、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-7,8 の InSAR 解析については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-9 の干渉性を確認すると、天上山周辺以外の大部分の地域で、干渉度 0.3 ~ 0.6 程度の地域が確認できる。一方、天上山周辺では 0.8 程度の高い干渉度が得られているため、上図 D-9 の InSAR 解析結果については、天上山周辺に関しては妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-10 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-10 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-11,12 の干渉性を確認すると、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-11,12 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-13 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-13 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-14 の干渉性を確認すると、神津島西部の一部の地域で、干渉度 0.4 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-14 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-15 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域で、干渉度 0.9 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-15 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

上図 D-16 の干渉性を確認すると、神津島西部及び東部の一部の地域で、干渉度 0.3 程度の地域が確認出来るが、天上山周辺を含む神津島の大部分の地域で 0.8 以上の高い干渉度が得られていることが確認できる。そのため、上図 D-16 の InSAR 解析結果については、妥当性のある解析結果であると判断した。

Fig. 5-2 の干渉性を確認すると、神津島の大部分の地域が干渉度 0.3 程度であり、天上山及び、神津島南西に位置する市街地で 0.8 以上の高い干渉性があることを確認できる。Sentinel-1A は、上述のように短い波長を照射し、観測を行なっている。波長が短い場合、植生などの影響で電波が地表まで到達せず、観測精度が低下することがある。この Sentinel-1A の SAR データにおいても、神津島の大部分の地域で干渉度が低いのは、観測に用いている波長による影響の可能性が大きく、植生の少ない天上山及び、神津島

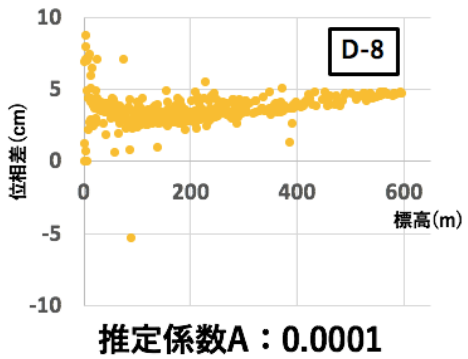
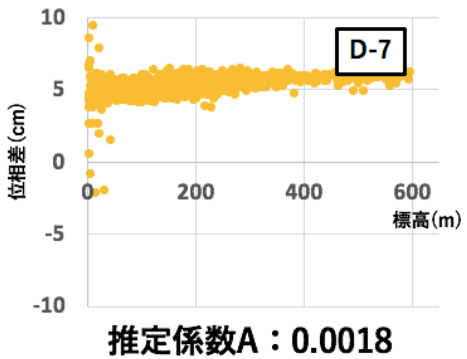
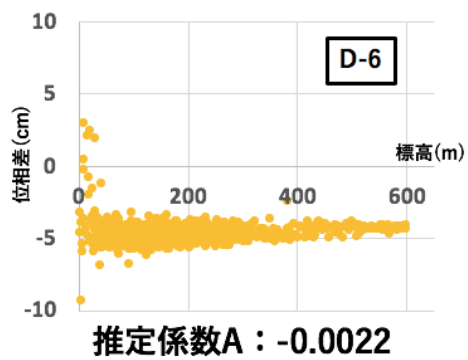
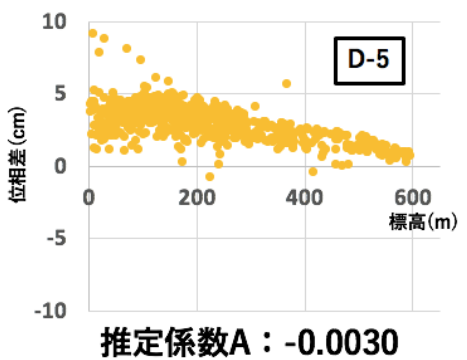
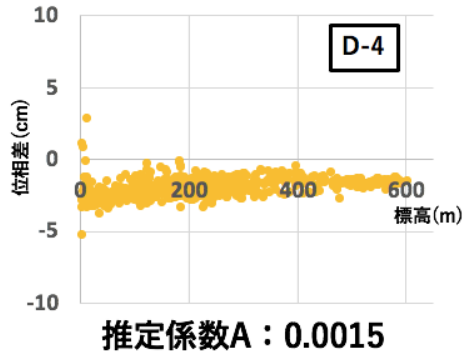
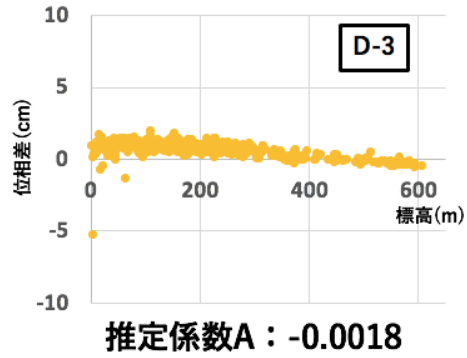
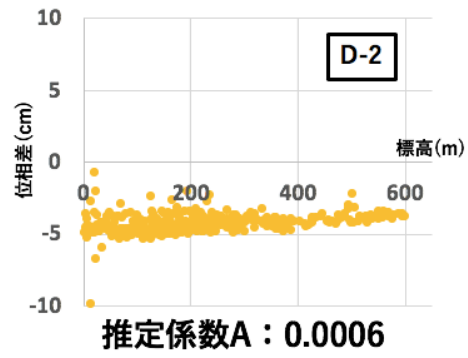
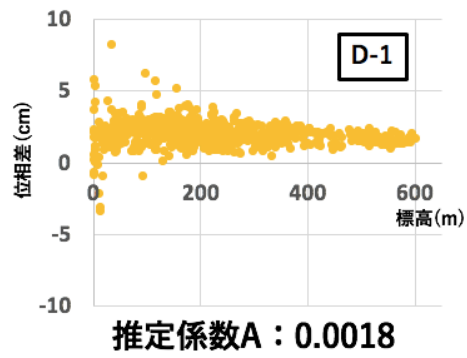
南西部においてのみ、高い干渉度が得られた。そのため、本研究においては、Fig. 5-2 の InSAR 解析結果については、高い干渉度が確認できる天上山及び、神津島南西部の地表変位のみを利用した。

5.2 伝播遅延補正による位相変化量に関する検討

3.2.2 でも述べたように、伝播位相遅延補正を実施した結果、標高に相関をもつ位相差が InSAR 解析結果に現れている可能性がある。上記補正は、以下の (5-1) に示すような推定式から求められる位相を計算し、InSAR 解析結果より差し引く。(5-1) からわかるように、推定式の傾きが大きい場合、標高が大きく影響する。この推定式は、InSAR 解析画像中より抽出される複数点の位相情報を用いて求められる。抽出する数は、再解析を繰り返し、その他の妥当性検討項目と合わせて判断した。

$$\begin{aligned}
 (1) \phi &= A \cdot \text{height} + B \\
 (2) \phi &= A \cdot \text{height} + Bxy + Cx + Dy + E \\
 (3) \phi &= A \cdot \text{height} + Bx^2y^2 + Cx^2y + Dx^2 + Exy^2 + Fxy + Gx + Hy^2 + Iy + J \\
 (4) \phi &= A \cdot \text{height} + Bx^3y^3 + Cx^3y^2 + Dx^3y + Ex^3 + Fx^2y^3 + Gx^2y^2 \\
 &\quad + Hx^2y + Ix^2 + Jxy^3 + Kxy^2 + Lxy + Mx + Ny^3 + Oy^2 + Py + Q
 \end{aligned}
 \tag{5-1}$$

本節では、この推定式の傾きを確認することで、標高に沿った位相の有無を確認する。推定式の傾きが大きい場合、標高に沿った位相が表れている可能性がある。以下に、4.2.1 で示した InSAR 解析毎に作成したグラフを Fig. 5-3 a から p に示す。なお、推定式の傾きは、推定係数 A として図中に示した。



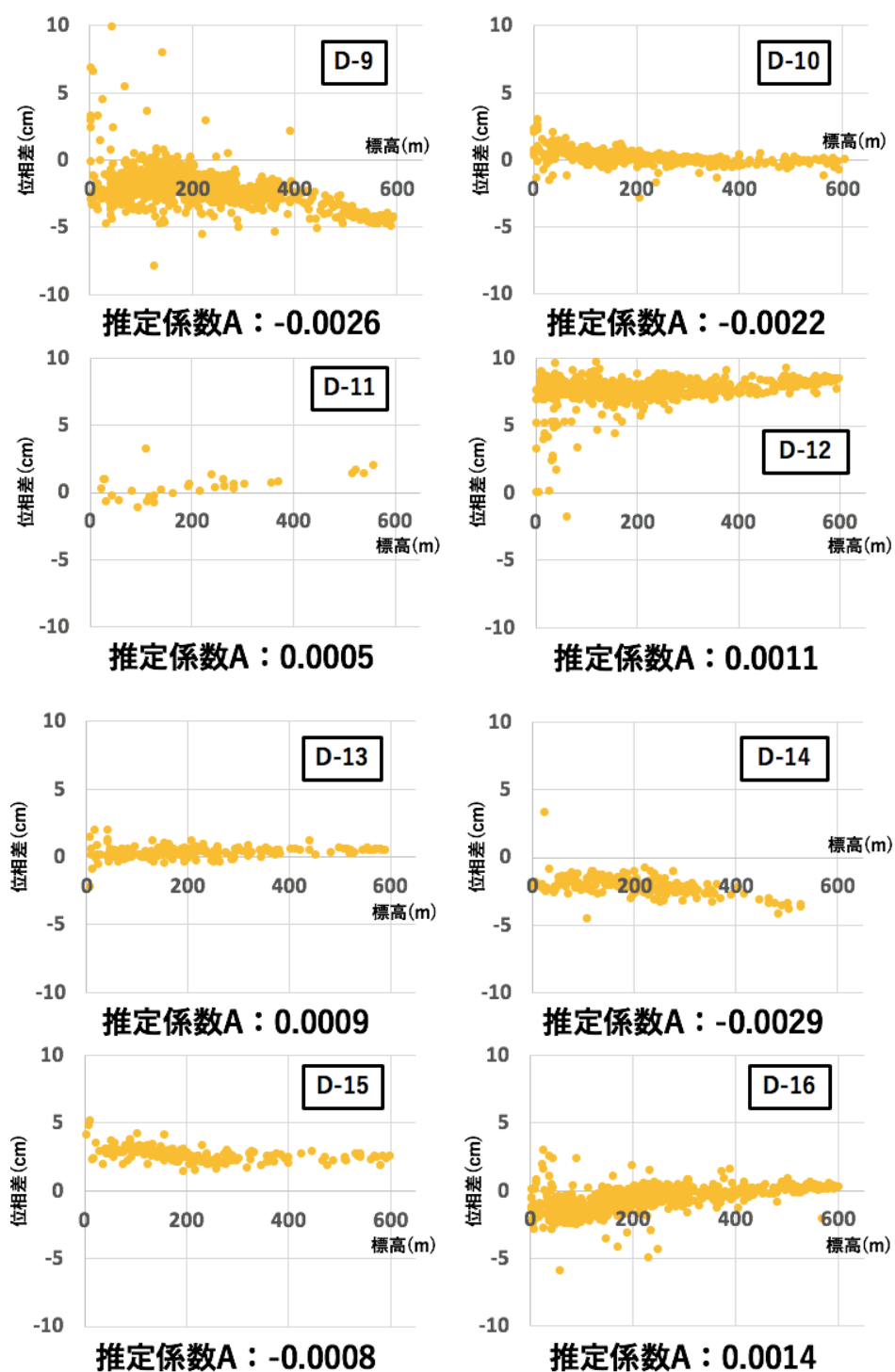


Fig. 5-3 InSAR 解析結果における位相差と標高の関係

上記に示した全てのグラフにおいて、位相分布全体からもわかるように、推定係数 A はかなり小さい。そのため、位相遅延補正によって、InSAR 解析結果に標高に沿った位相差が現れている可能性は低いと考えられる。

5.3 電子基準点データとの比較検討

3.2.3 で述べたように、神津島には電子基準点が 2 点設置されており、内 1 点（神津島 1A）は InSAR 解析のアンラッピング時に、地表変位の絶対値化の基準点として利用した。そのため、その他の 1 点（神津島 2）を用いて、InSAR 解析結果の妥当性を検討した。検討方法は、InSAR 解析結果と電子基準点がそれぞれ示す地表変位を比較し、誤差が 2 cm より大きかったものについては、再解析を行うこととした。ただし、再解析を繰り返しても、誤差が 2 cm 以下にならないものについては、その誤差が 3 cm 以下であるならば、解析結果として採用することとした。Table 5-1 に最終的な比較結果一覧を示す。なお、誤差については、InSAR 解析結果から電子基準点が示す地表変位量を差し引いたものである。

Table 5-1 電子基準点データとの比較検討結果一覧

電子基準点名:神津島2				
軌道	干渉ペア	電子基準点	InSAR解析	誤差
Ascending	20150710_20160401	-1.5	-1.1	0.4
	20161209_20170317	-0.5	-0.7	-0.1
	20160401_20160708	0.3	1.3	1.0
	20160708_20161209	-0.4	-1.9	-1.4
Descending	20141204_20151008	-0.3	-0.4	-0.1
	20151008_20151231	-0.6	-0.6	0.0
	20151231_20160407	-0.7	0.1	0.8
	20160407_20160519	0.4	1.1	0.7
	20160519_20160630	-0.2	1.2	1.4
	20160630_20160908	-0.1	1.9	2.0
	20160908_20161201	0.2	-0.5	-0.8
	20161201_20170323	-0.4	2.2	2.6
	20170323_20170629	0.4	1.2	0.8
	20170629_20170907	-0.3	-1.9	-1.6
	20170907_20171130	0.2	3.1	2.9
	20171130_20180125	-0.1	0.7	0.8
	20180125_20180208	-0.4	-0.3	0.1
	20180208_20180503	0.1	0.4	0.3
	20180503_20180628	-0.3	-0.7	-0.5
	20180628_20181129	0.6	0.7	0.1

単位：cm

5.4 異なる SAR データの InSAR 解析結果比較検討

3.2.4 でも述べたように、本研究では、異なる SAR データの InSAR 解析結果を比較し、その妥当性を検討した。用いた InSAR 解析結果は、Fig. 4-2(e)の InSAR 解析結果 D-1 と、Fig. 4-3 の InSAR 解析結果 (Sentinel-1A) である。

ALOS-2 の SAR データを解析する際には、アンラッピングによる位相の絶対値化を行い、電子基準点を基準の変位として、InSAR 解析結果全体の変位を得た。しかし、Sentinel-1A の InSAR 解析結果は、Fig. 3-7, Fig. 5-2 からわかるように、電子基準点設置点の干渉度はかなり低い。そのため、電子基準点を基準として、InSAR 解析結果全体の変位を得ようとする、通常ではありえないような結果を示す。アンラッピングによって、InSAR 解析結果中の各ピクセルの絶対値化は成功していると仮定すると、InSAR 解析画像中のピクセル間の相対的な変位を比較することで、妥当性を検討することが出来る。比較には、平均化した地表変位を用いた Fig. 5-4 に赤色で示す 24 のピクセルを用いた。本研究では、ALOS-2, Sentinel-1A の両方で干渉度が高い地域のみを比較検討することとした。なお、黒で着色したピクセルを基準とし、その他のピクセルの相対変位をそれぞれ計算したもので比較を行った。

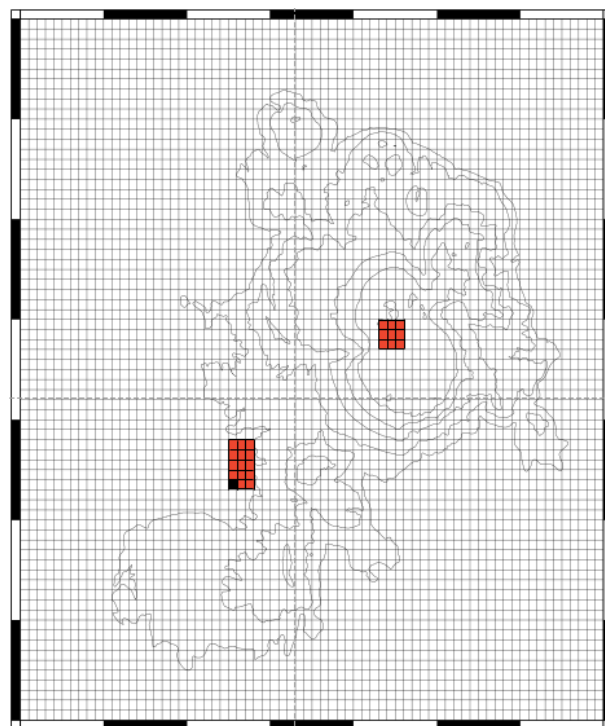


Fig. 5-4 比較対象のピクセル. 赤色の領域は比較に使用したピクセルを表す. ただし、黒で着色したピクセルを基準とし、その他のピクセルの相対変位をそれぞれ計算したもので比較を行った。

比較検討のため、横軸に ALOS-2、縦軸に Sentinel-1A の相対変位をとったグラフを作成し、Fig. 5-5 に示す。比較の結果、Fig. 5-5 からわかるように、それぞれの解析結果に高い相関がみられることがわかる。

独立した SAR データの解析結果から、同様の変位傾向が得られたことから、本研究の InSAR 解析結果の妥当性は高いと判断できる。

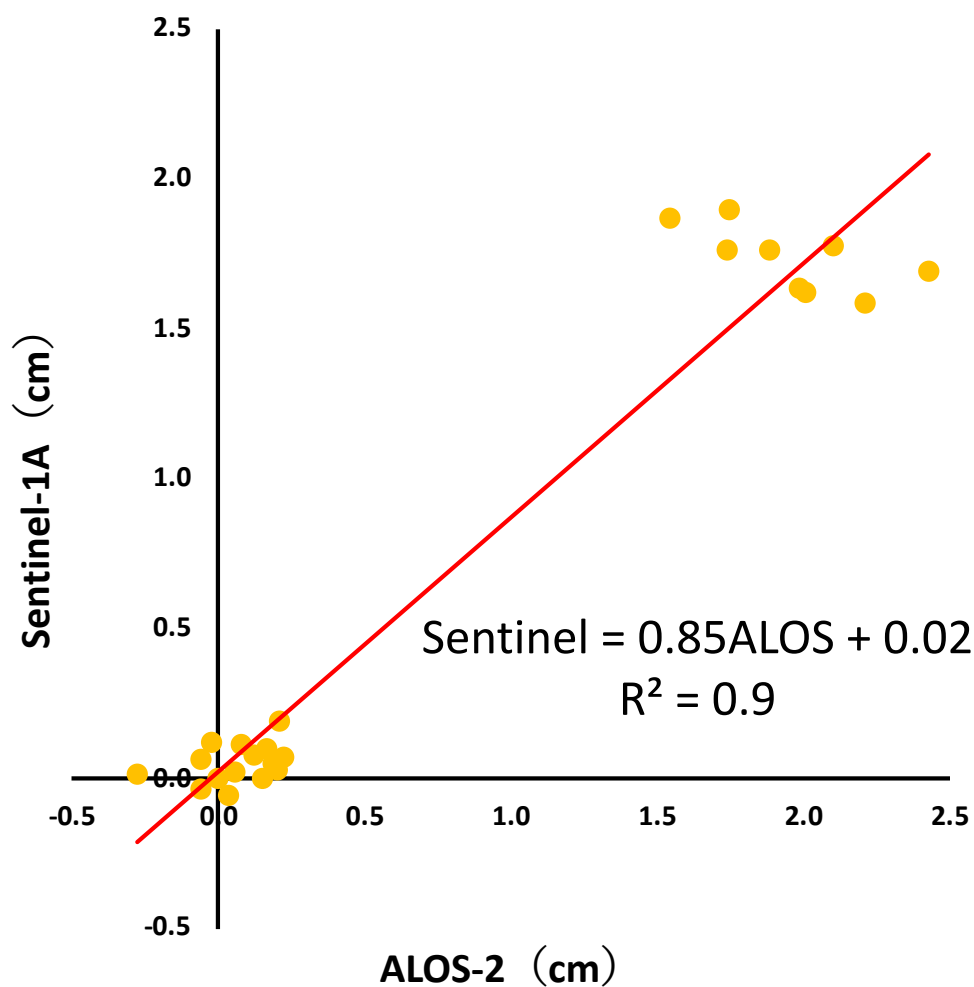
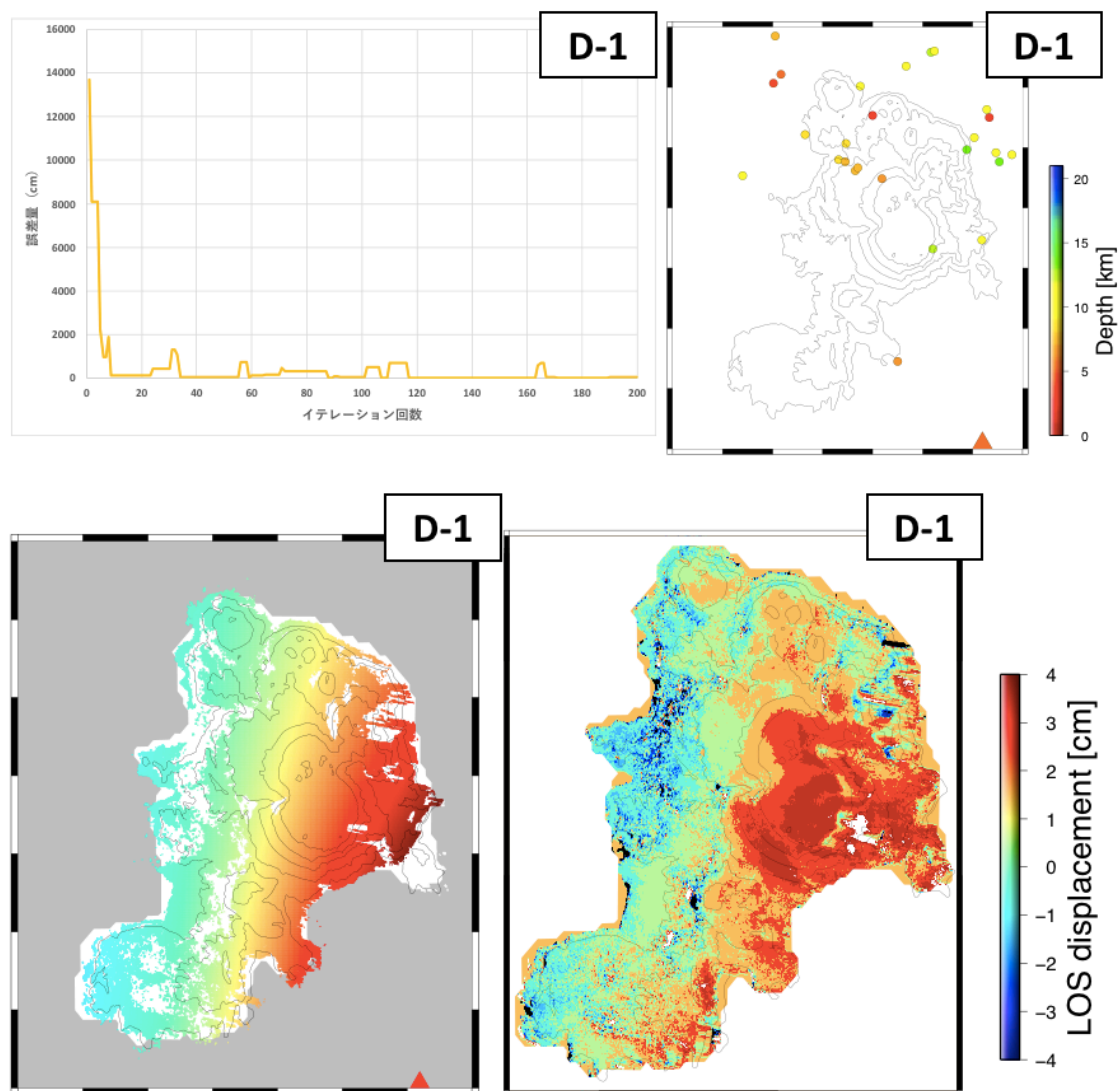


Fig. 5-5 異なる SAR データの InSAR 解析結果比較

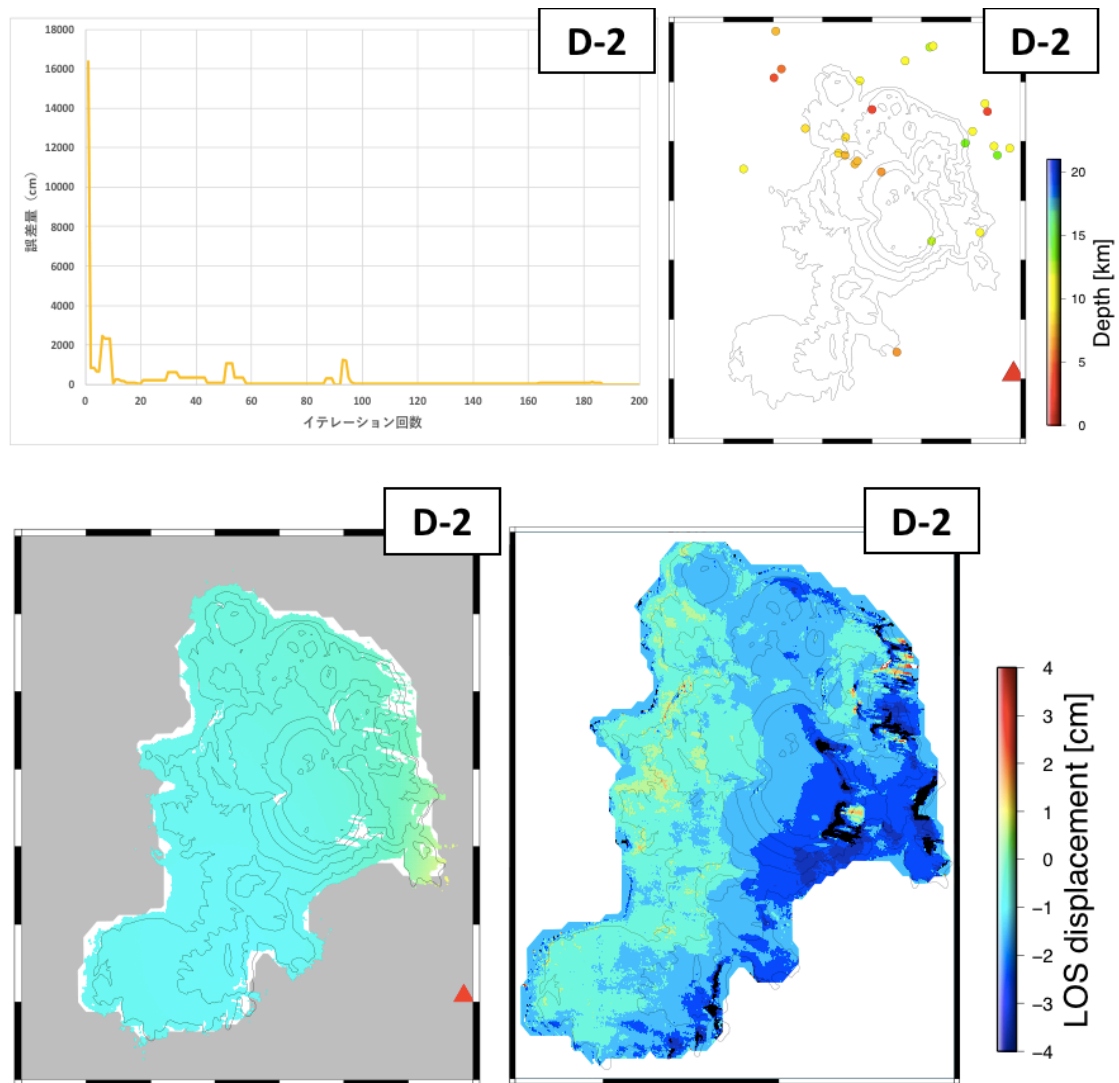
6 逆解析による圧力源推定の結果

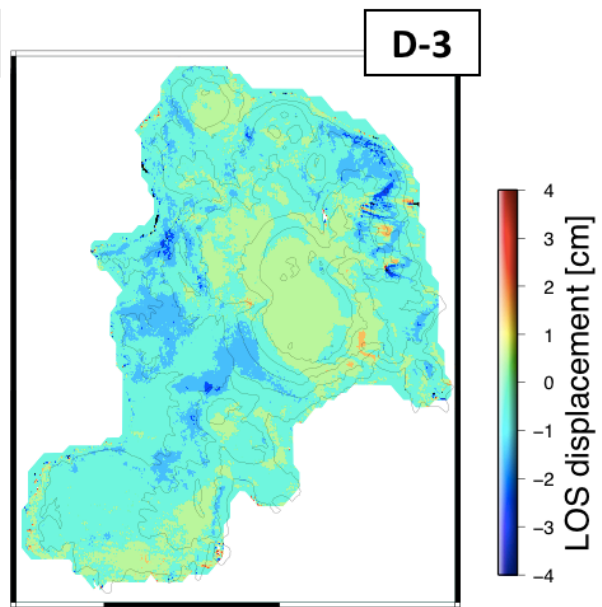
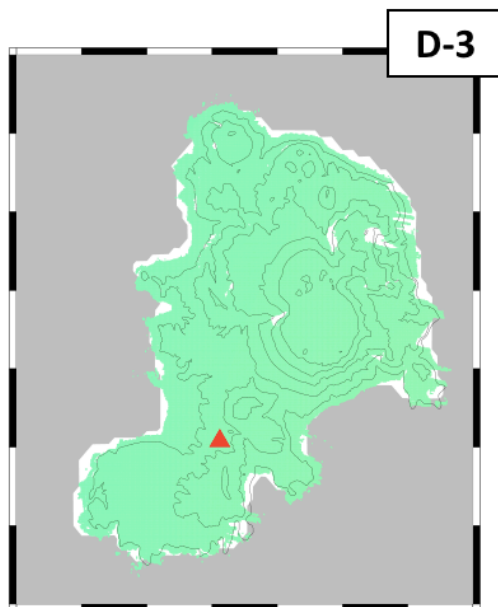
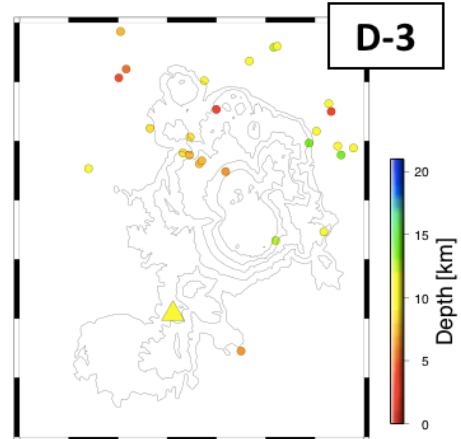
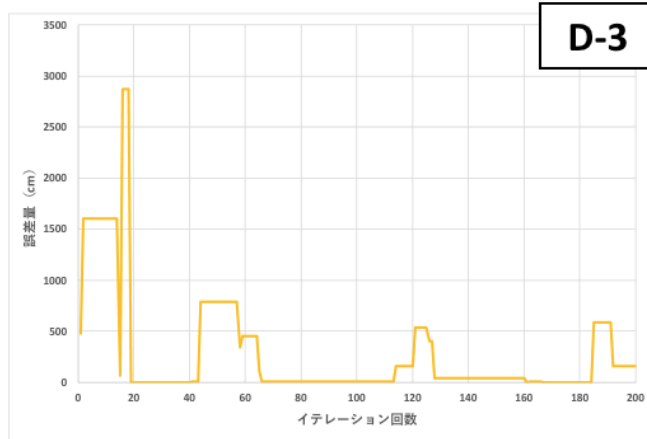
前述のように、本研究では InSAR 解析結果を用いて、圧力源を推定する逆解析を実施した。逆解析に使用した InSAR 解析結果は、4.2 で示した InSAR 解析結果 D-1 から D-16 である。以下に逆解析結果 D-1 から D-16 を Fig. 6-1 a~p に示す。また、逆解析の結果をまとめた表と図を Table 6-1, Fig. 6-2 に示す。

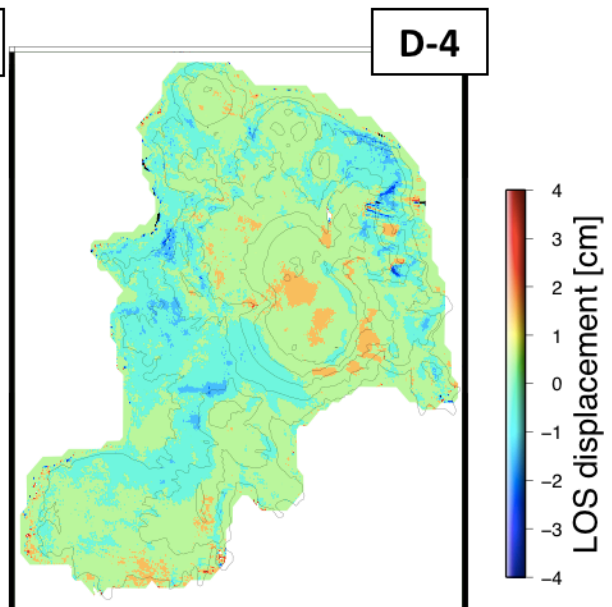
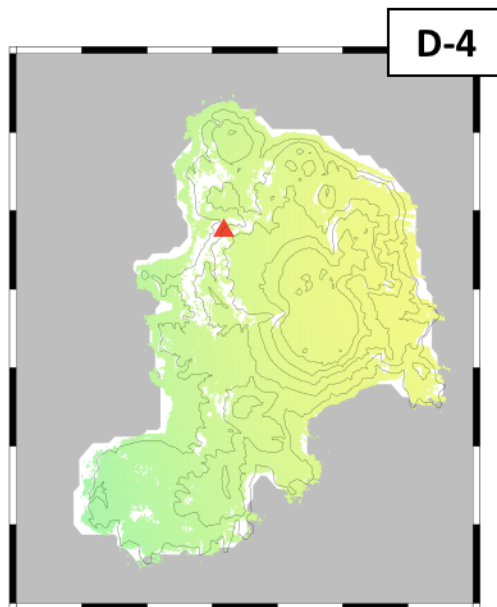
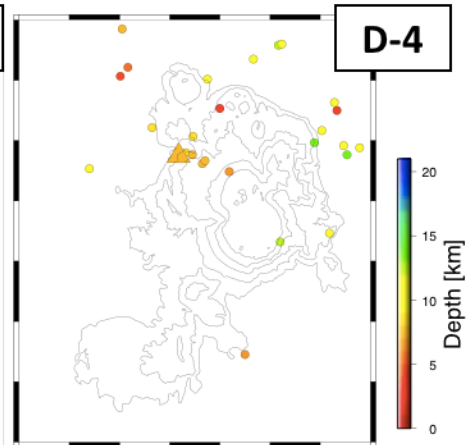
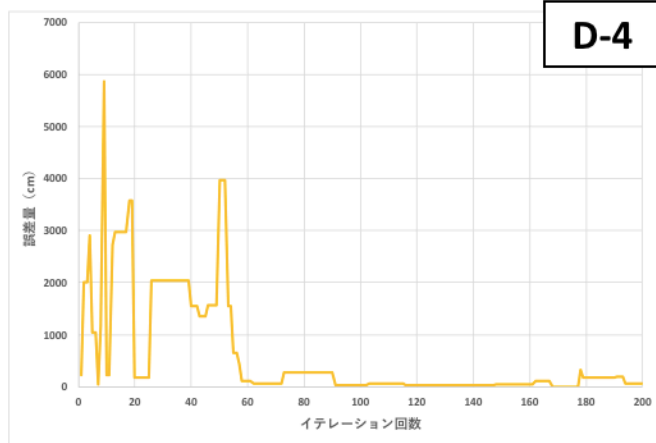


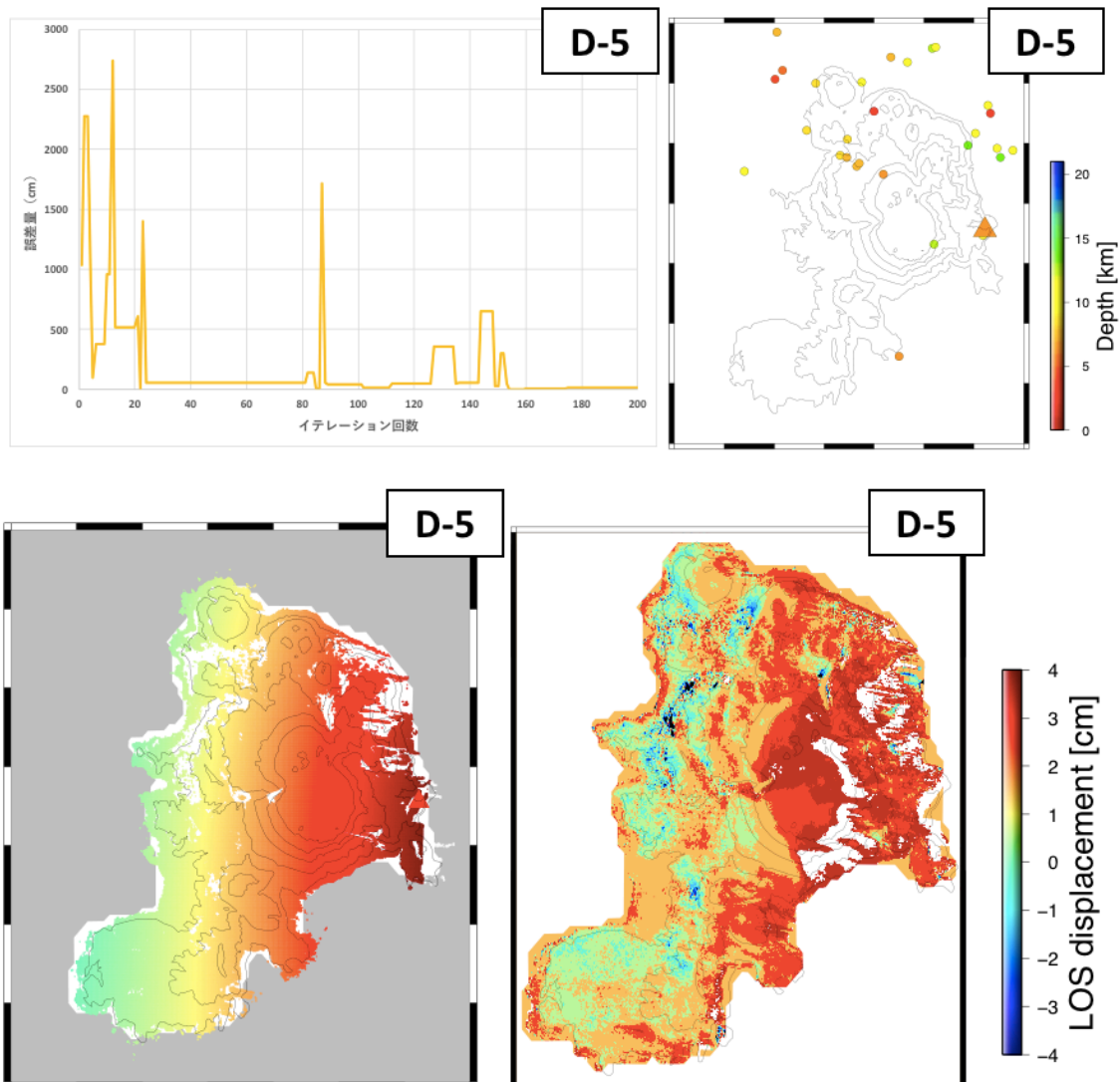
上記 Fig. 6-1 a において、左上図は逆解析における最適解探索の経路を示すため、縦軸に誤差量、横軸にイテレーション回数をとったグラフである。なお、誤差量とは、InSAR 解析結果と、推定した圧力源モデルによる地表変位との誤差を 1 ピクセル (約 10 m 平方) あたりで計算した量である。また、右上図は 2013 年から InSAR 解析期間までに観測された地震の震源位置と、推定された圧力源の位置をプロットした図である。震

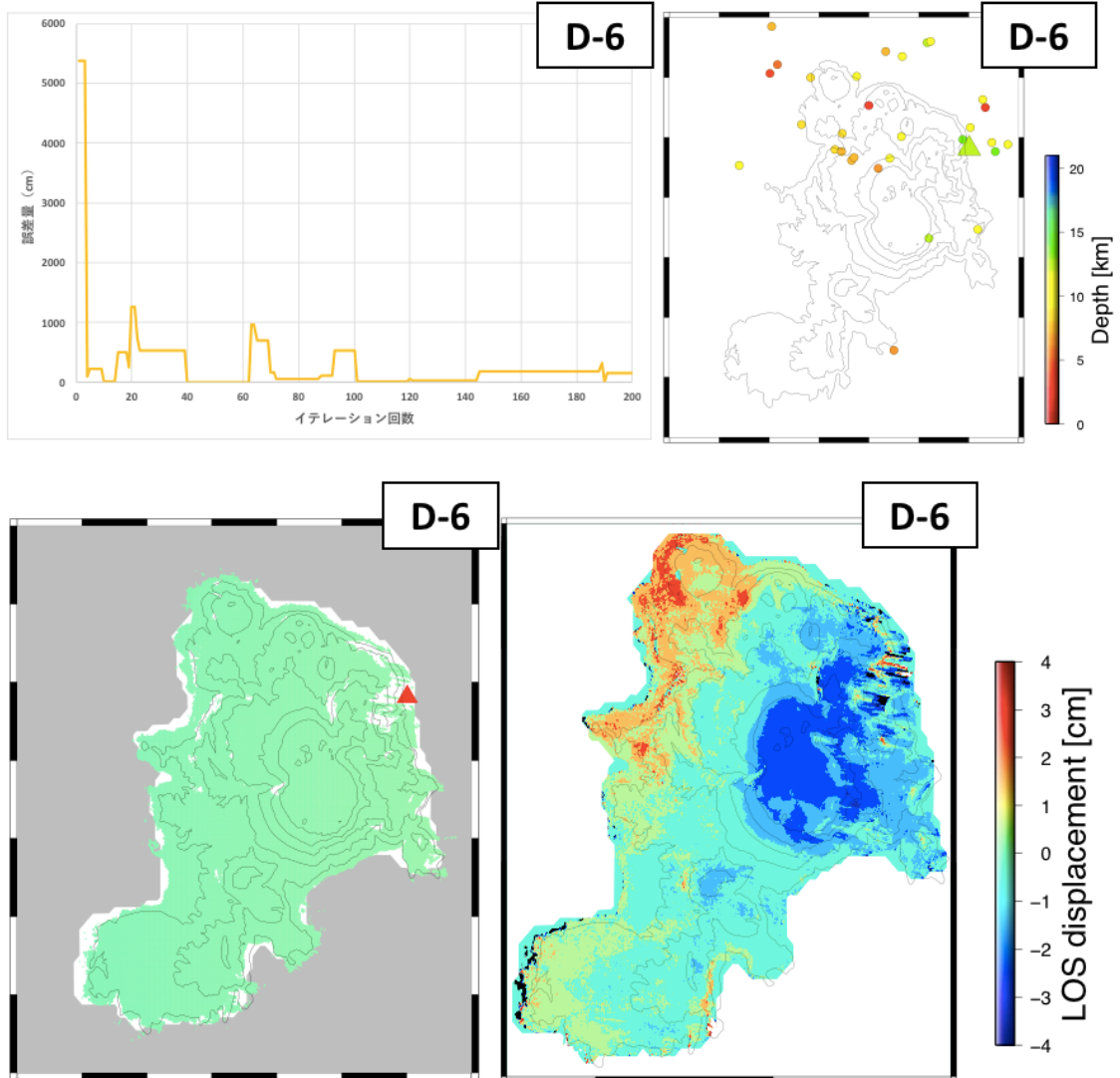
源位置は、国立研究開発法人防災科学技術研究所が公開している Hi-net 自動処理震源リストのデータを用いた。左下の図は、推定された圧力源による地表変位を表した図であり、比較のため、逆解析に用いた InSAR 解析結果を右下図に示した。上記と同様の図をそれぞれの逆解析について作成し、以下に示した。

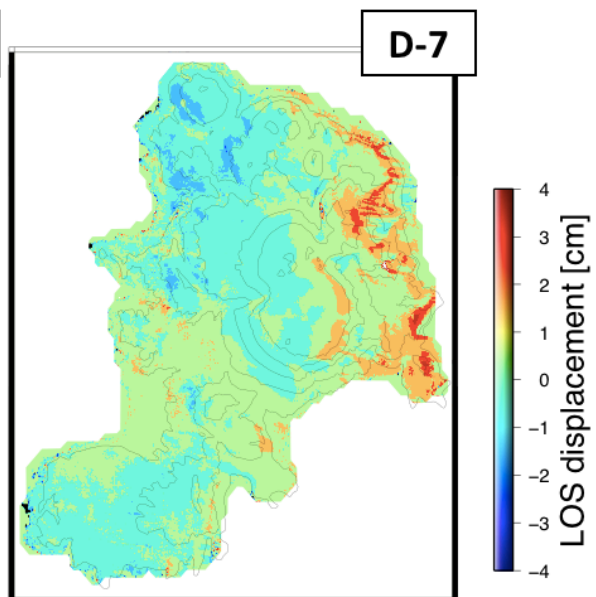
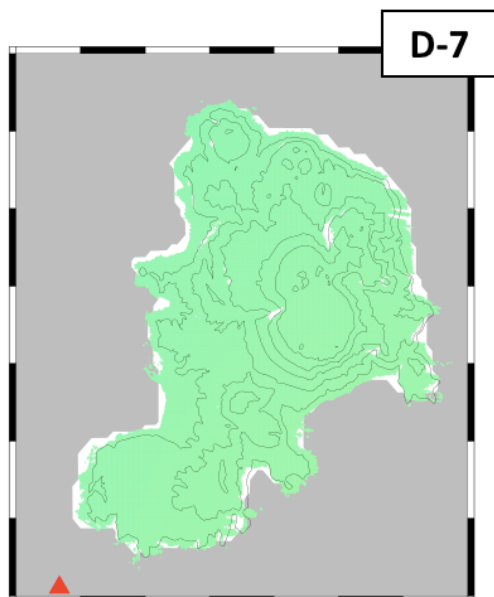
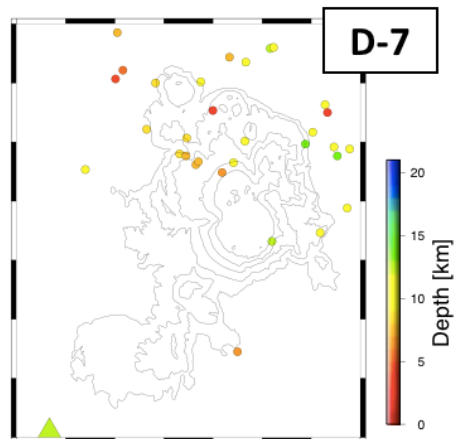
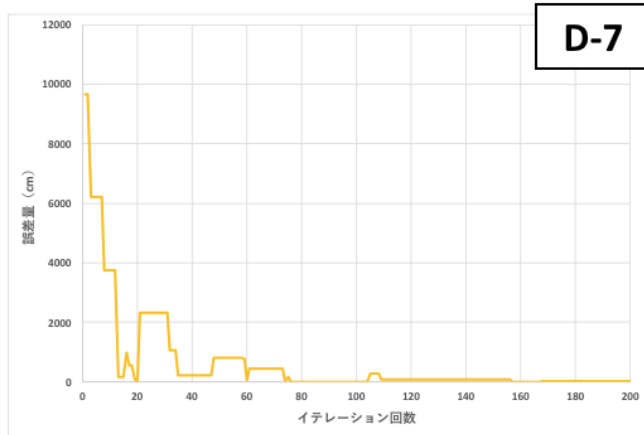


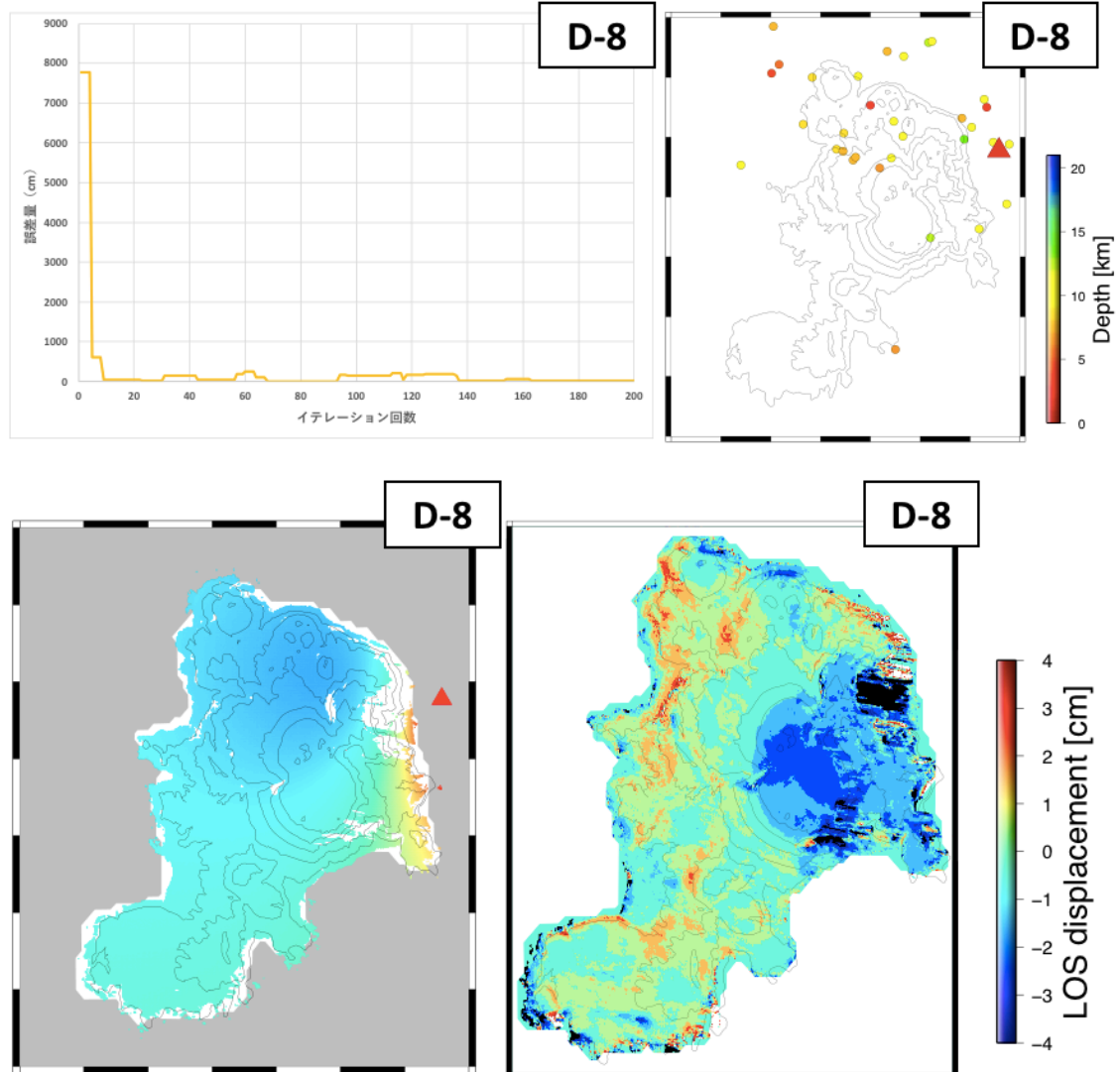


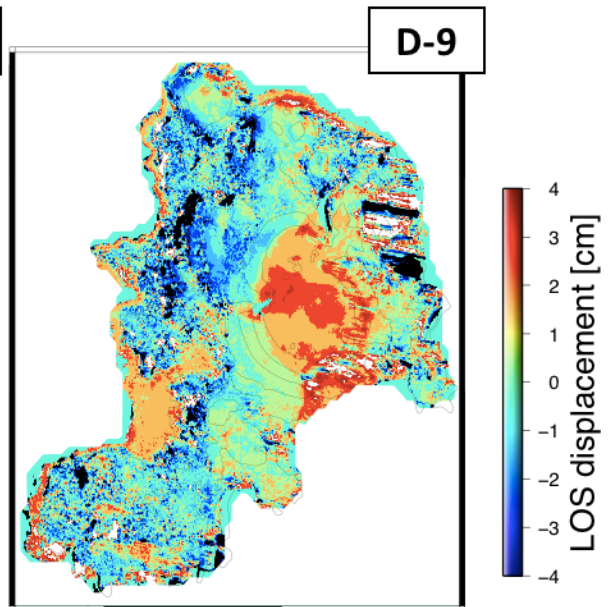
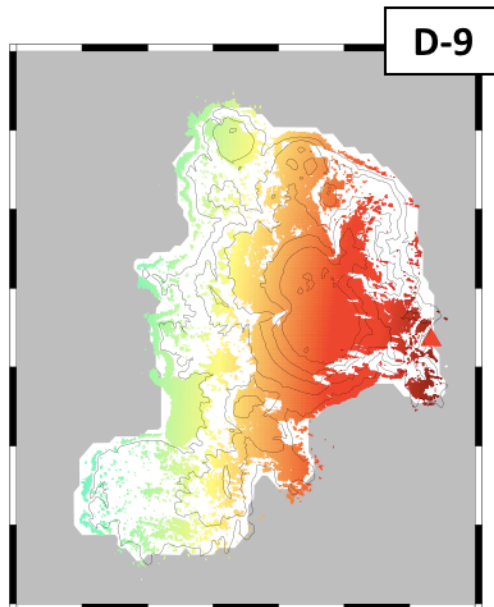
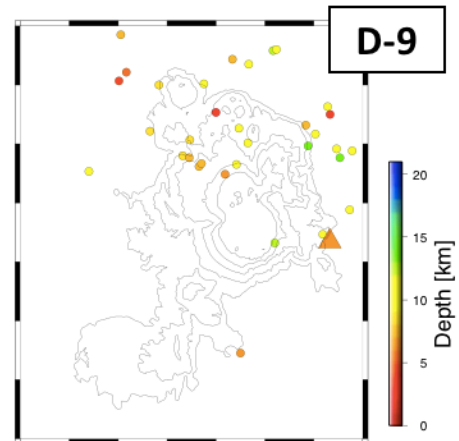
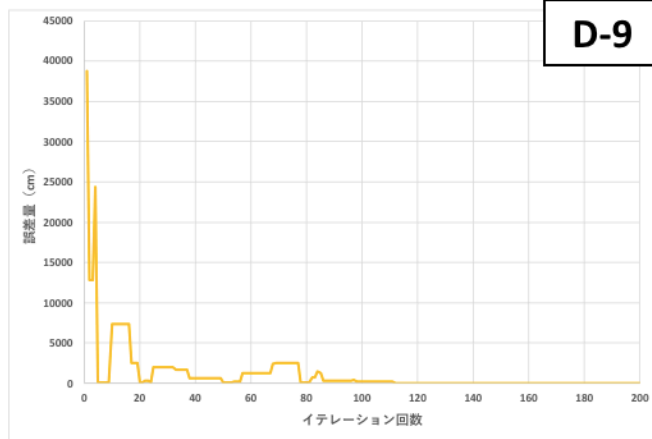


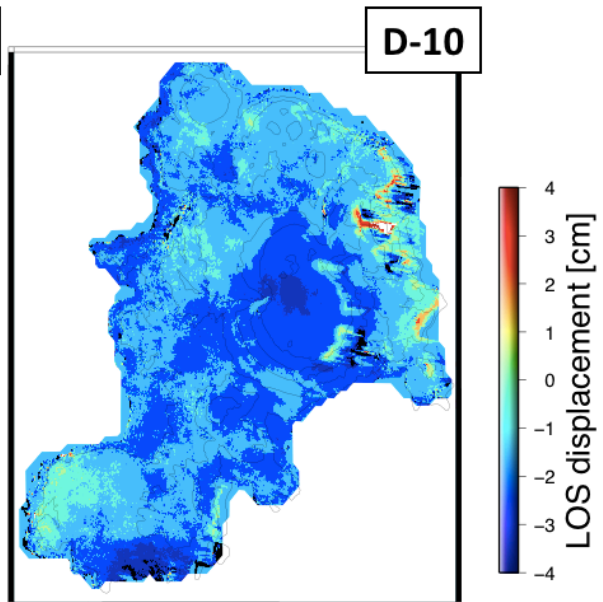
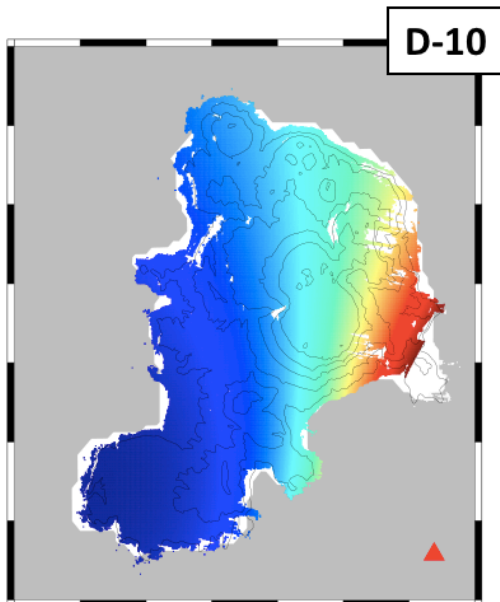
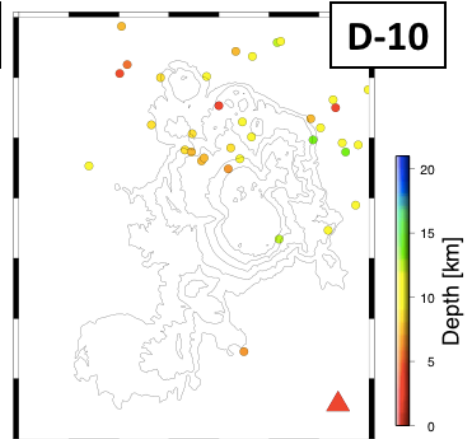
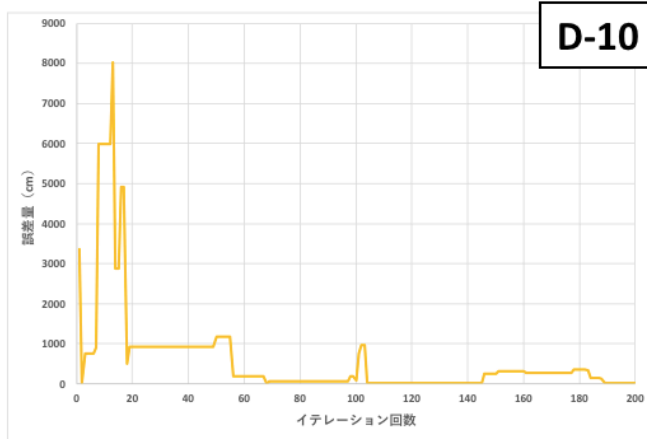


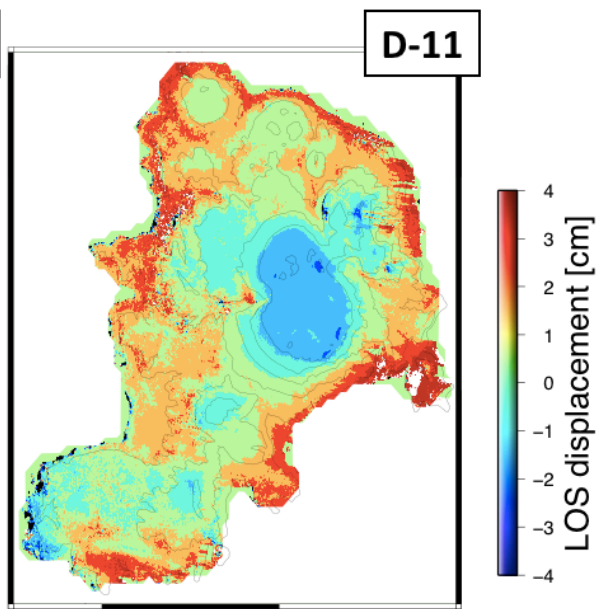
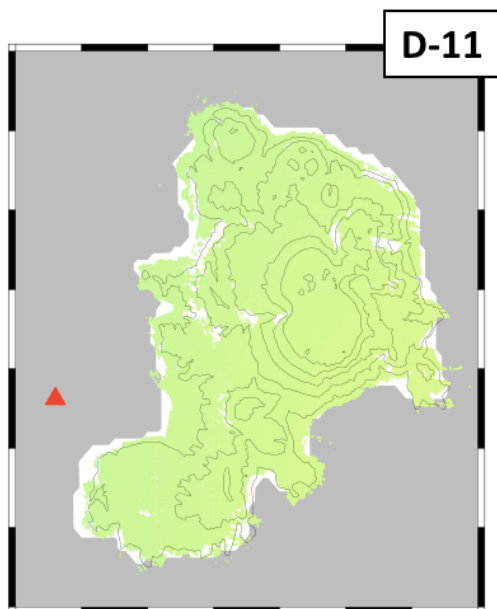
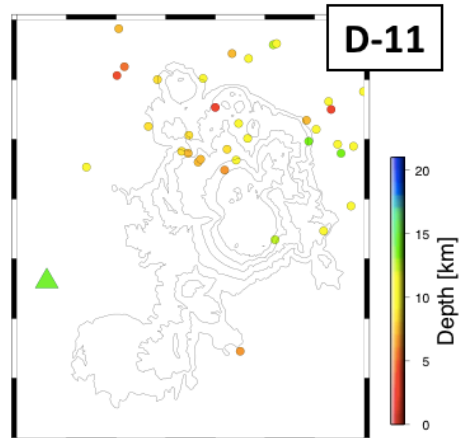
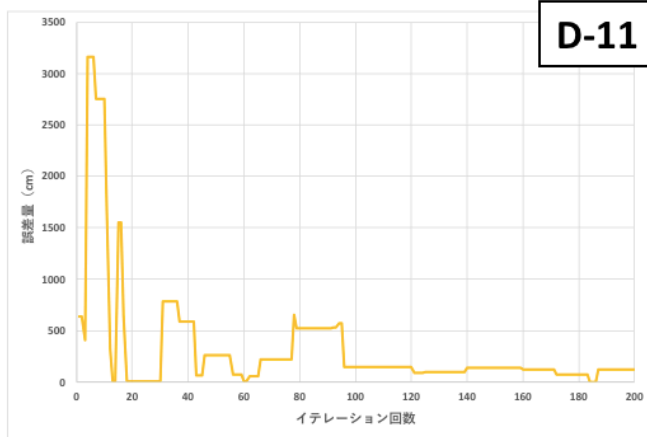


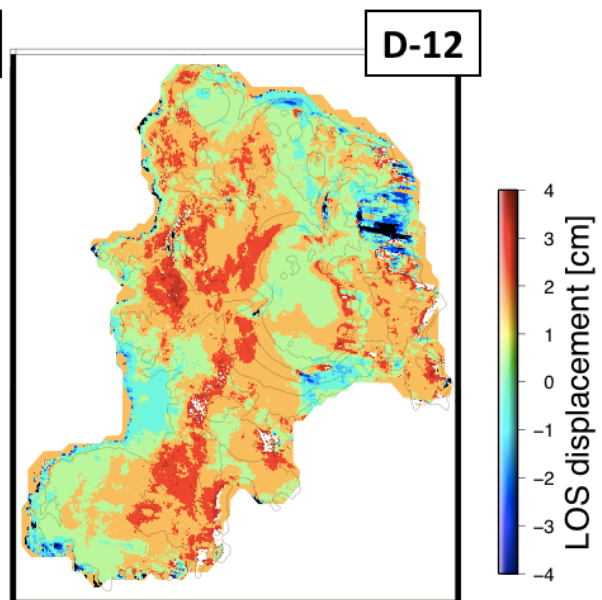
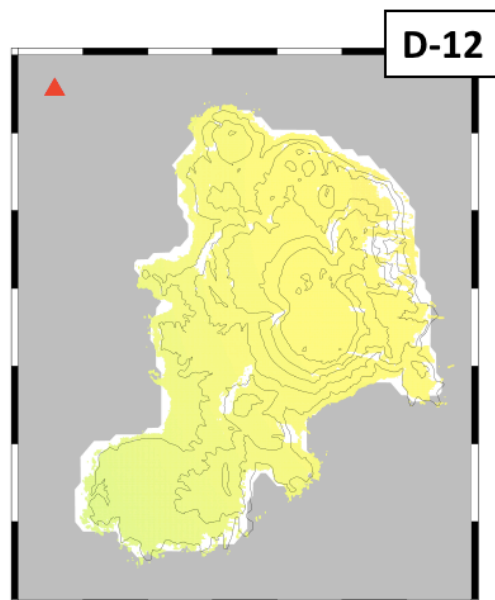
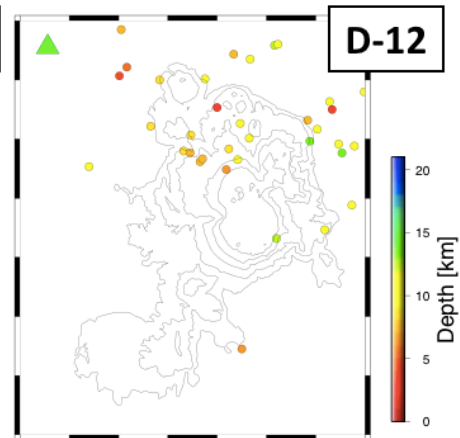
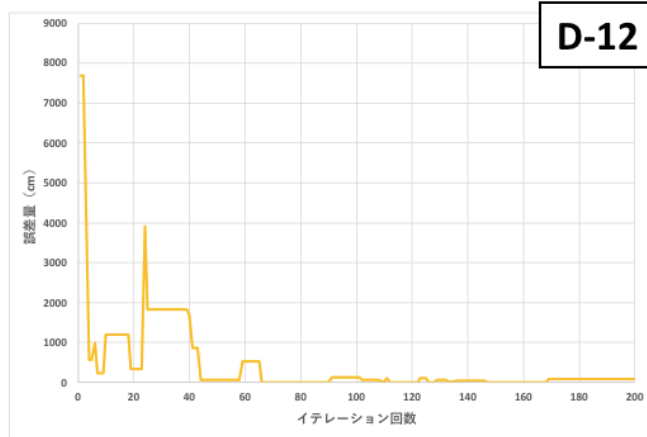


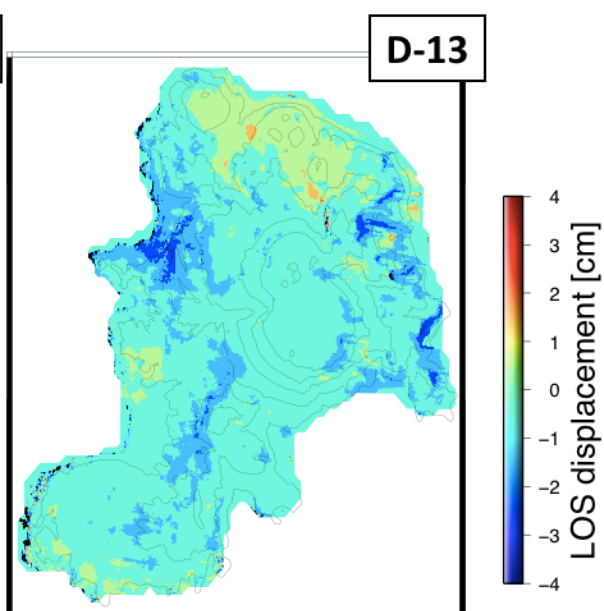
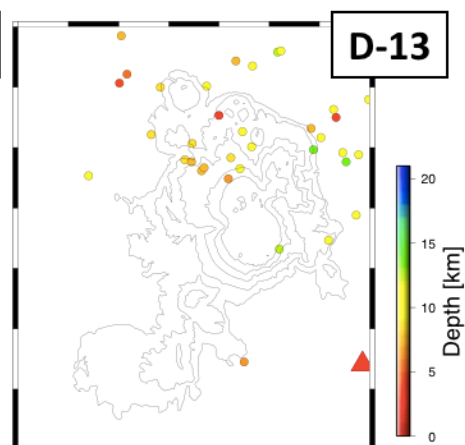
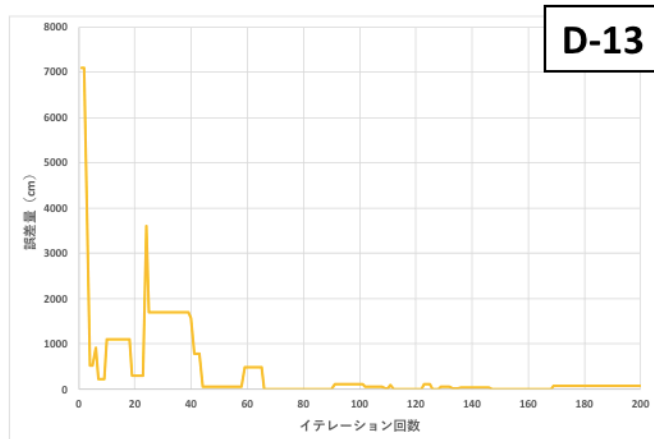


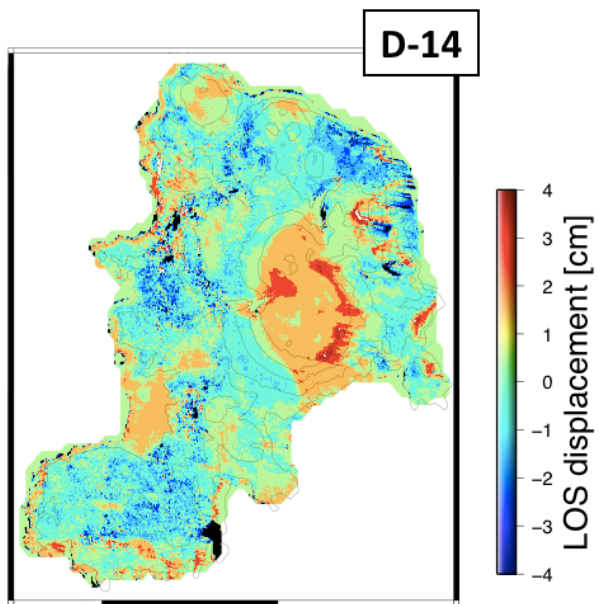
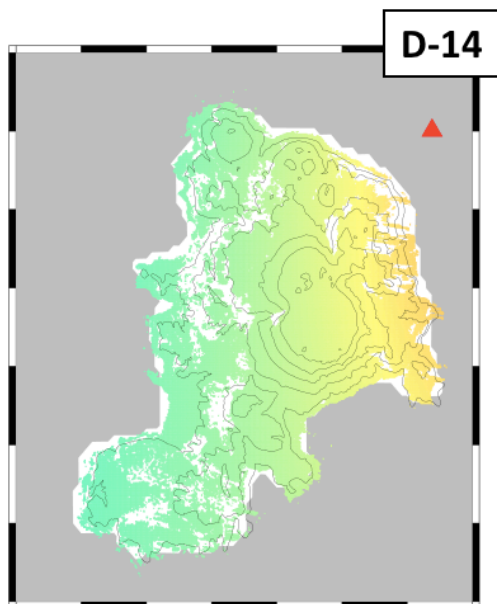
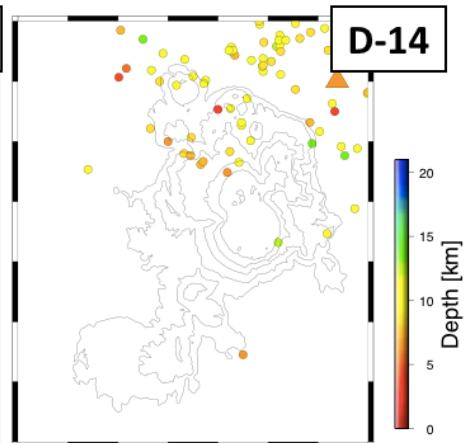
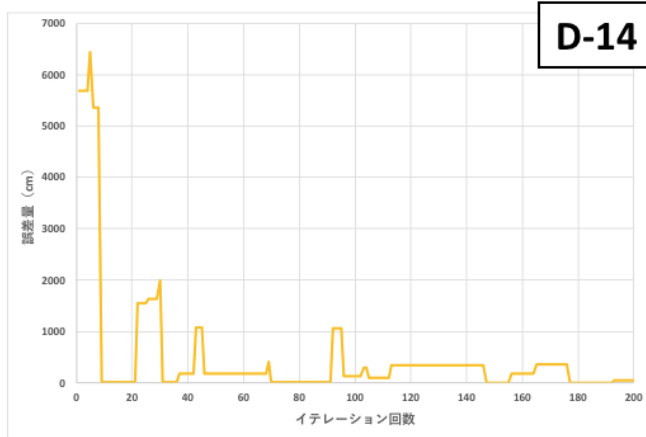


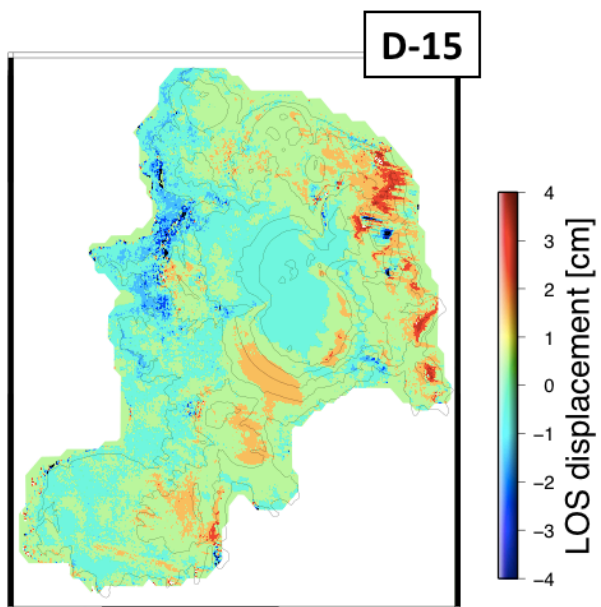
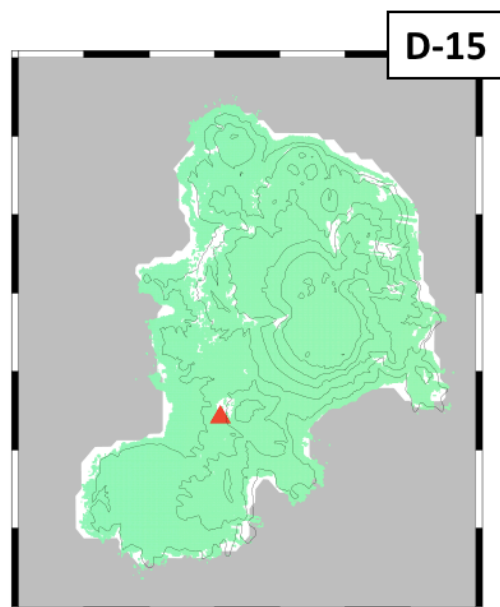
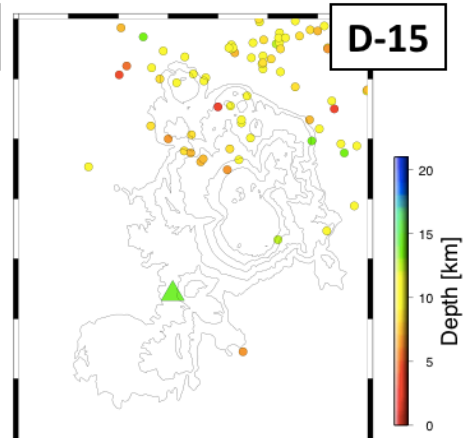
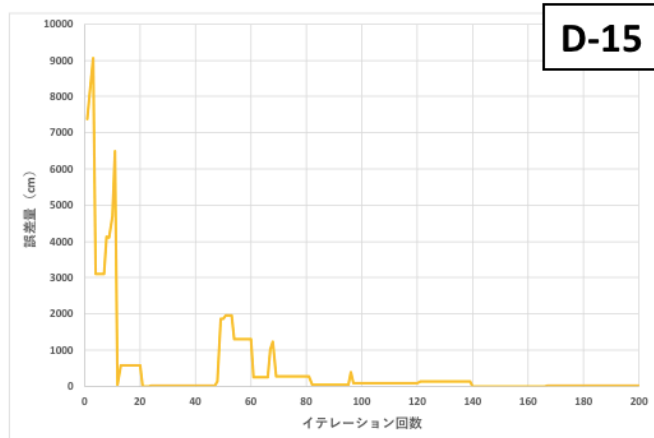












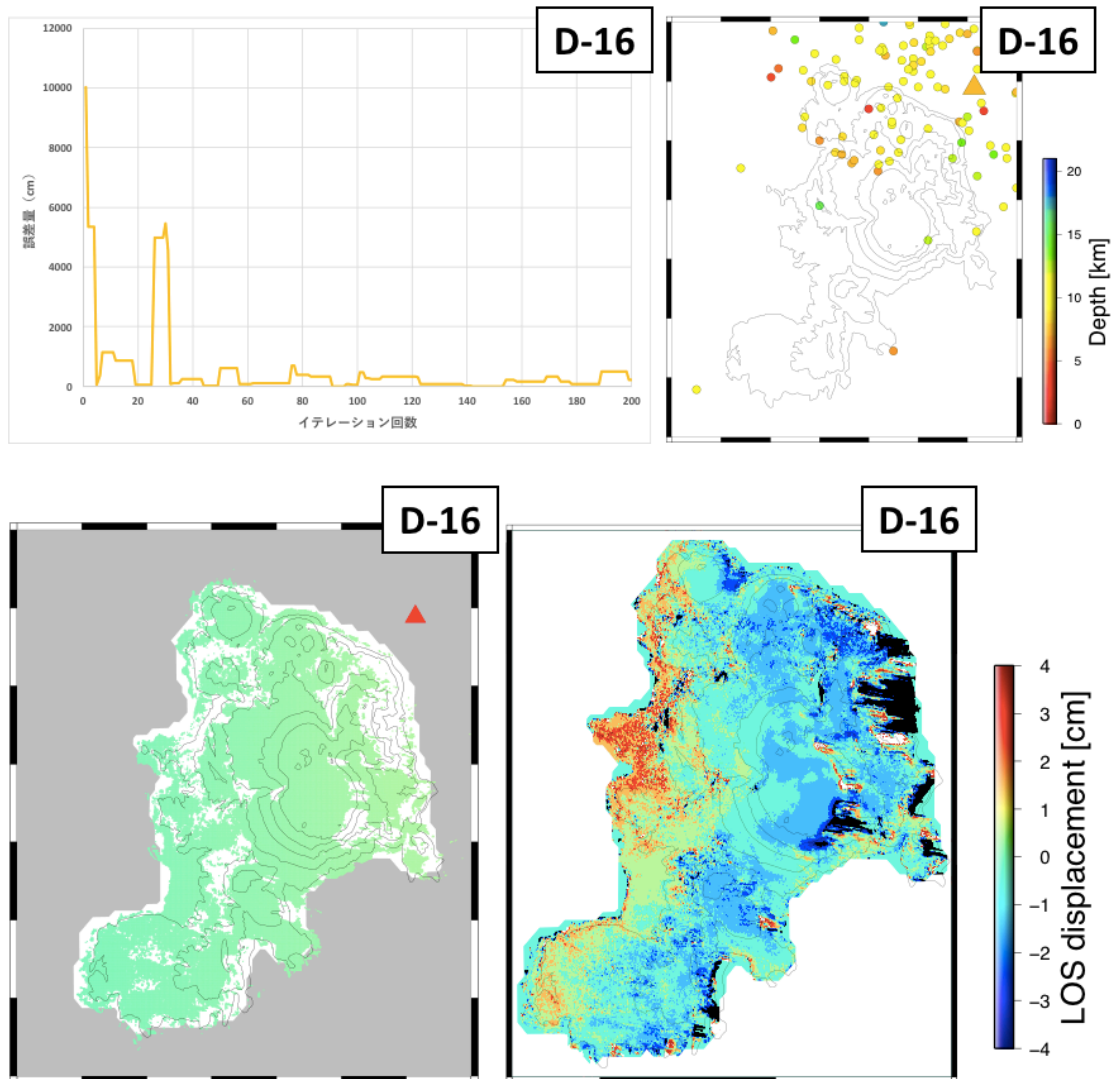


Fig. 6-1 逆解析結果

Table 6-1 逆解析結果一覧表

逆解析対象の InSAR解析結果	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	体積変化量 (km^3)	誤差 (cm)
D-1	34.180588	139.171935	5.6	0.0020	0.9
D-2	34.190794	139.178595	1.9	0.0003	1.3
D-3	34.200789	139.141179	9.6	0.0001	0.8
D-4	34.227477	139.141798	7.2	0.0003	0.8
D-5	34.215569	139.172219	6.9	0.0015	1.0
D-6	34.228129	139.170083	12.7	0.0002	1.3
D-7	34.181087	139.116683	12.3	0.0001	0.7
D-8	34.227765	139.175806	1.1	0.0003	1.5
D-9	34.213457	139.173270	6.9	0.0014	1.8
D-10	34.185765	139.173818	2.9	0.0019	1.9
D-11	34.206229	139.116010	14.5	0.0004	1.2
D-12	34.245549	139.115621	14.1	0.0006	1.0
D-13	34.194124	139.178631	2.6	0.0000	0.8
D-14	34.240077	139.173822	6.2	0.0005	1.2
D-15	34.204183	139.140925	14.8	0.0001	0.8
D-16	34.238904	139.171388	7.5	0.0002	1.5

誤差量：InSAR 解析結果との誤差量

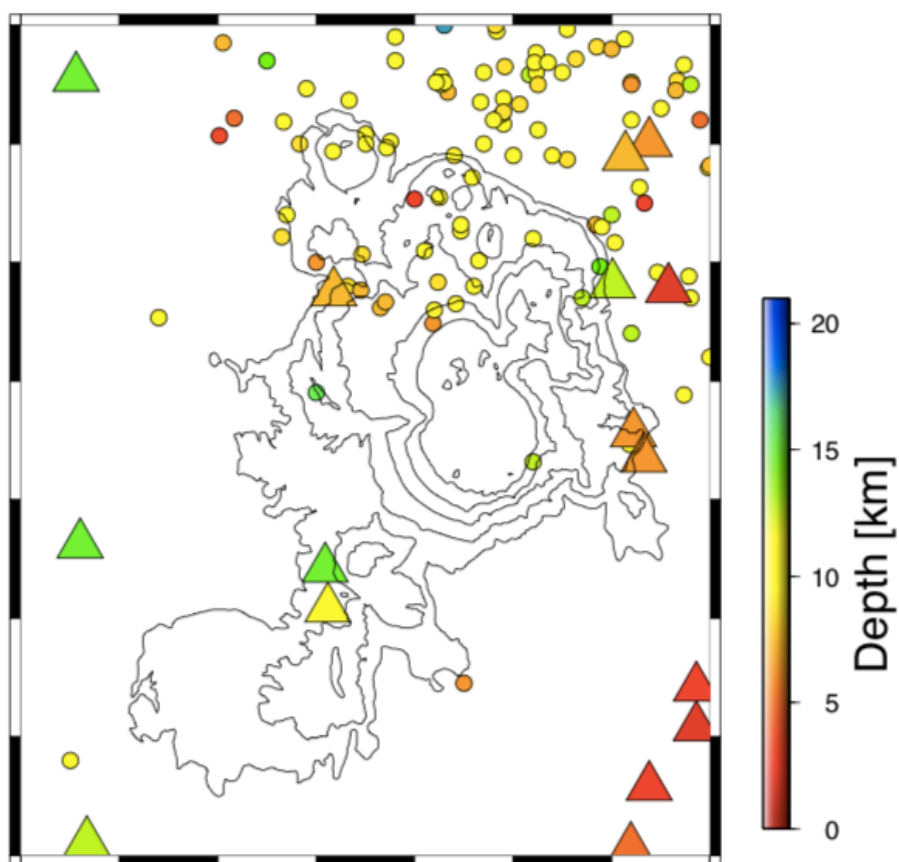


Fig. 6-2 逆解析結果まとめ

7 InSAR 解析結果を用いた考察

本章では、神津島の地表変位について、各種検討を行う。なお、検討に使用する InSAR 解析結果は、全て 4 章で示したものを使用する。

7.1 神津島における長期的な地表変位について

神津島の長期的な地表変位を Fig. 4-2 e~t を用いて検討する。これらの InSAR 解析結果は、同一軌道 (Descending) の SAR データを解析しており、時系列的に連続してた解析結果群であるため、長期的な地表変位の特徴を把握しやすい。期間は、2014 年 12 月 4 日から、2018 年 11 月 29 日の約 4 年間である。

上述の解析結果を確認すると、約 4 年間に、衛星視線方向 (以下、LOS 方向) に最大 4 cm 程度の地表変位が確認できる。特に、神津島北東部に位置する天上山周辺では、その他の地域と比較して、比較的大きな地表変位が確認できる (Fig. 4-2 e, f, i, j, l, m, n, o, r)。2.2 で紹介した名古屋大学大学院理学研究科ほか (2001) では、神津島北東部深さ 2 km に圧力源が存在する可能性を指摘しており、本研究の InSAR 解析結果において確認できる天上山周辺の比較的大きな地表変位は、この圧力源に起因している可能性が考えられる。

次に、異なる軌道 (Ascending) の SAR データ解析結果と合わせて検討する。前述のように、本研究では神津島を対象として、ALOS-2 が取得した異なる軌道の SAR データを InSAR 解析している。ただし、Descending の SAR データに比べて、Ascending の SAR データは、利用可能なデータが少なく、限定的な期間のみの比較となった。Descending の解析結果同様、Ascending においても複数の解析結果において、LOS 方向に 4 cm 程度の地表変位が神津島で確認できる。特に、Fig. 4-2 d の InSAR 解析結果 A-4 と、Fig. 4-21 の InSAR 解析結果 D-8 では、天上山を含む神津島東部で、LOS 方向に遠ざかる地表変位が同様に確認できる。Ascending、Descending の解析結果双方で、同一方向の地表変位が表れている場合、地表変位には水平方向の変位成分よりも、上下方向の変位成分が大きく影響している可能性が高い。そのため、A-4、D-8 に見られる衛星から遠ざかる地表変位は、地表が沈下している鉛直方向の変位である可能性が高いことを示している。

上記のように、神津島では 2014 年 12 月 4 日から、2018 年 11 月 29 日の約 4 年間で、神津島北東部に位置する天上山周辺で比較的大きな地表変位が確認できる。さらに、そのような変位は、沈下などの上下方向の変位である可能性が考えられ、神津島北東部深さ 2 km に存在が示唆されている圧力源に起因するものである可能性がある。

7.2 神津島における短期的な地表変位について

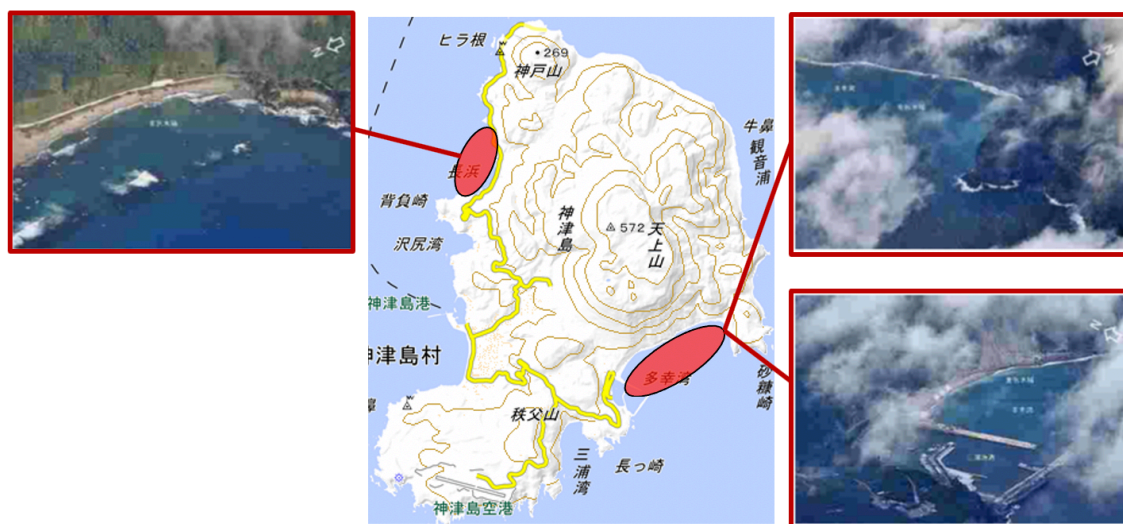
7.1 では、神津島における長期的な地表変位に着目し、天上山周辺で比較的大きな地表変位が存在することを確認した。本節では、そのような地表変位と、神津島における火山活動との関連性に焦点を当て、より短期的な地表変位の特徴を検討した。なお、前述のように、本研究では火山活動に関連した現象である可能性が考えられる周辺水域の変色を取り上げた。

また、逆解析によって推定された圧力源の位置に関する検討を観測された震源位置などと合わせて検討した。

7.2.1 地表変位と周辺水域変色の関連性

2.2 で示したように、神津島周辺で水域変色が複数回観測されている。これらが観測された時期の地表変位を InSAR 解析を用いて確認し、その関連性を検討する。

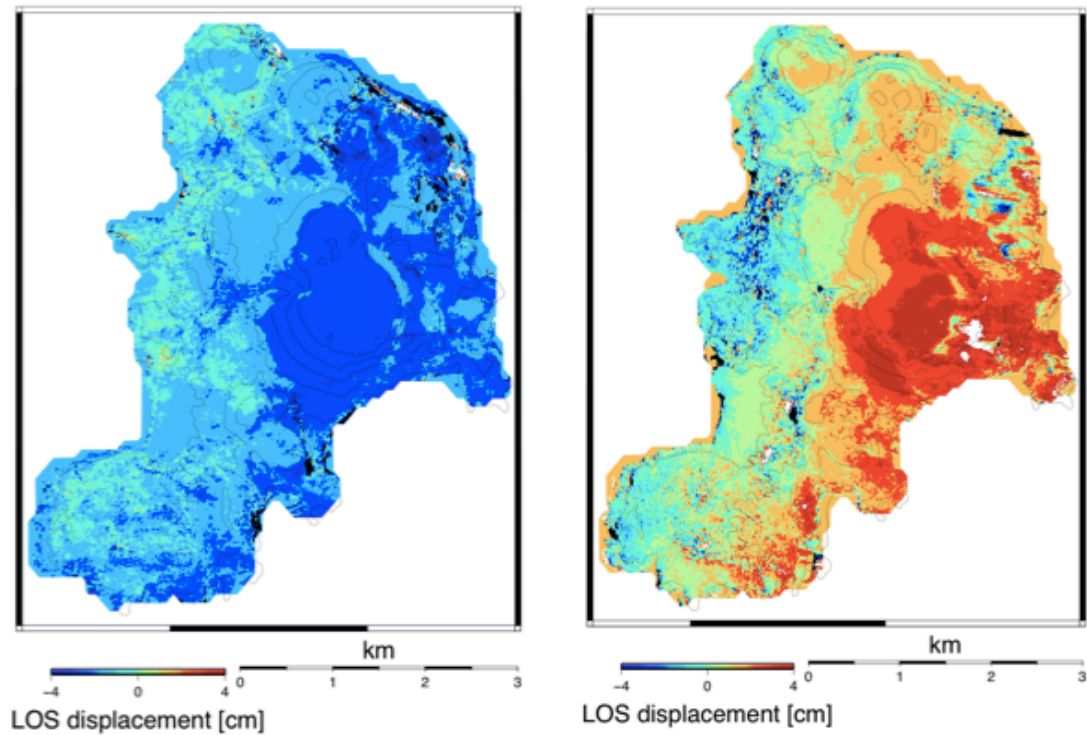
本研究の InSAR 解析期間中に観測された最初の水域変色は、2015 年 8 月 18 日の水域変色である。Fig. 2-2 a に示したような 2 ヶ所の水域で変色が確認されている。2015 年 8 月 18 日を含む干渉期間で InSAR 解析した結果が、Fig. 4-2 a, e の InSAR 解析結果 A-1, D-1 である。7.1 でも述べたように、これらの解析結果からは、比較的大きな地表変位が天上山周辺で確認でき、天上山に近い多幸湾で水域変色が確認された。



(a) 2015 年 8 月 18 日の変色水域の様子

Fig. 2-2 神津島周辺で観測された水域変色（地理院地図，火山噴火予知連絡会資料より作成）（再掲）

A 20150710_20160401 266days D 20141204_20151008 308days

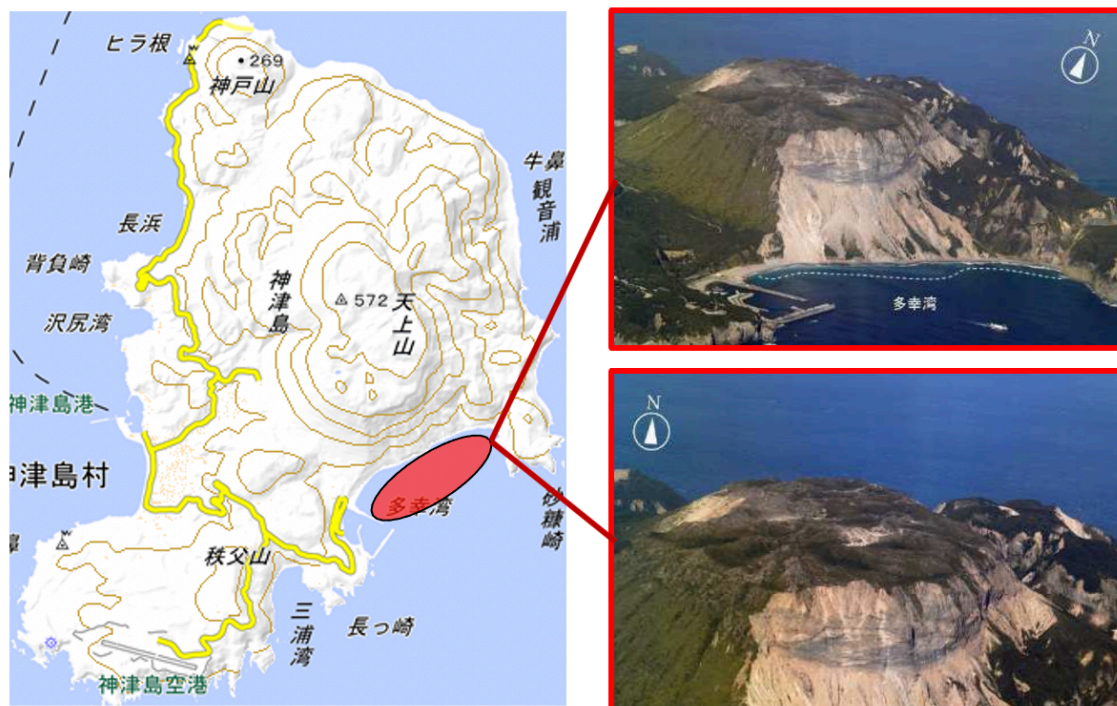


(a) A-1

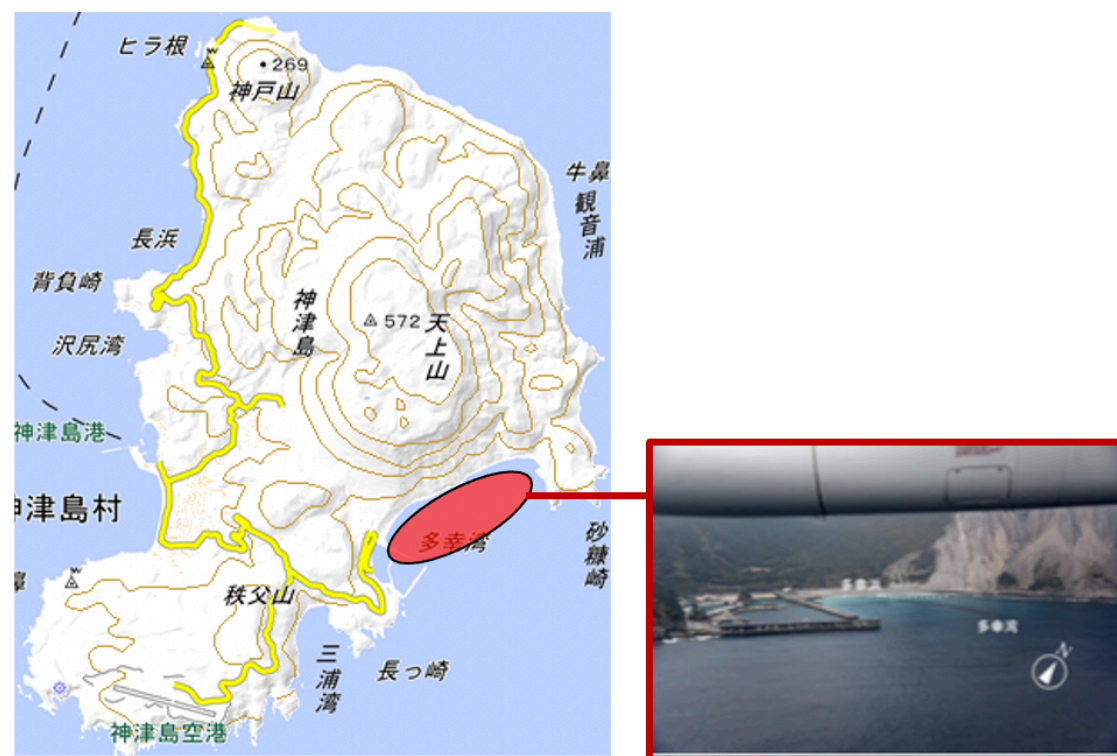
(e) D-1

Fig. 4-2 InSAR 解析結果（再掲）

2 度目の水域変色が確認されたのは、2016 年 12 月 24 日である．2016 年 12 月 24 日を含む干渉期間で InSAR 解析した結果は、 Fig. 4-2 1 に示す InSAR 解析結果 D-8 である．この解析期間中には、3 度目の水域変色（2017 年 3 月 14 日）も観測されており、1 度目の変色時期同様、Fig. 2-2 b, c で示した変色水域に近い天上山周辺で、比較的大きな地表変位が確認できる．



(b) 2016 年 12 月 24 日の変色水域の様子（再掲）



(c) 2017 年 3 月 14 日の変色水域の様子（再掲）

D 20161201_20170323 112days

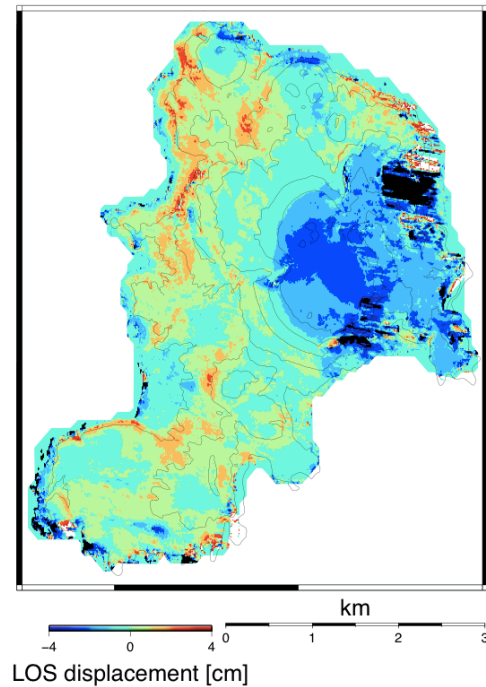
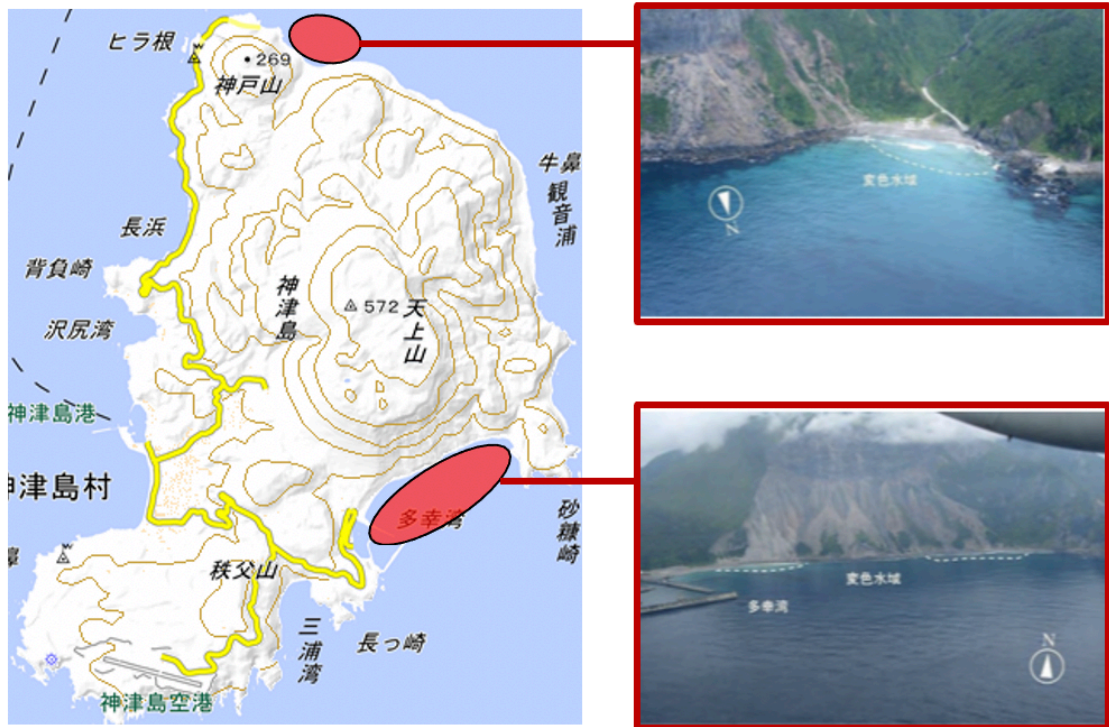


Fig. 4-21 InSAR 解析結果 D-8（再掲）

4度目の水域変色は、2017年6月27日に観測された。2017年6月27日を含む干渉期間で InSAR 解析した結果は、Fig. 4-2 m に示す InSAR 解析結果 D-9 である。Fig. 2-2 dで示したように、それまでの変色同様、神津島東側の多幸湾で水域変色が観測された。ただし、それまでの変色と異なり、神津島北部の返浜においても変色が観測された。InSAR 解析結果を確認すると、返浜近くには目立った地表変位は確認できないが、多幸湾に近い天上山で比較的大きな地表変位が確認できる。



(d) 2017 年 6 月 27 日の変色水域の様子 (再掲)

D 20170323_20170629 98days

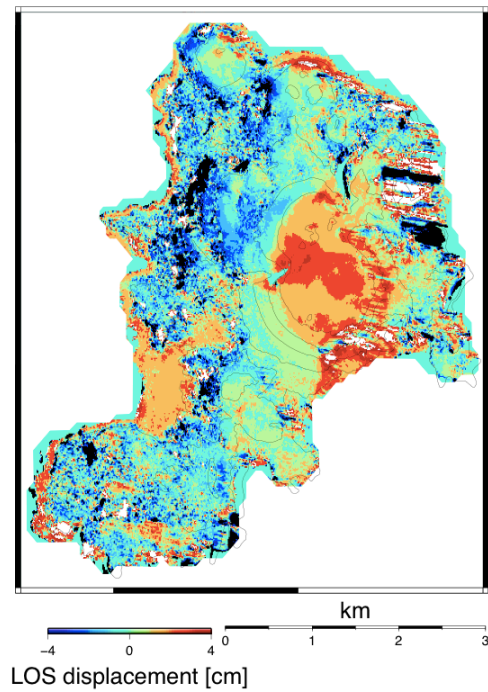


Fig. 4-2 m InSAR 解析結果 D-9 (再掲)

2018年3月3日には、5度目の水域変色が観測された。変色水域は、Fig.2-2 eに示すように、4度目の水域変色同様の2ヶ所（返浜、多幸湾）である。2018年3月3日を含む干渉期間でInSAR解析した結果は、Fig. 4-2 rのInSAR解析結果D-14である。4度目の変色時同様、返浜近くには目立った地表変位は確認出来ず、多幸湾近くの天上山では、比較的大きな地表変位を確認できる。



(e) 2018年3月3日の変色水域の様子

Fig. 2-2 神津島周辺で観測された水域変色（地理院地図，火山噴火予知連絡会資料より作成）（再掲）

D 20180208_20180503 84days

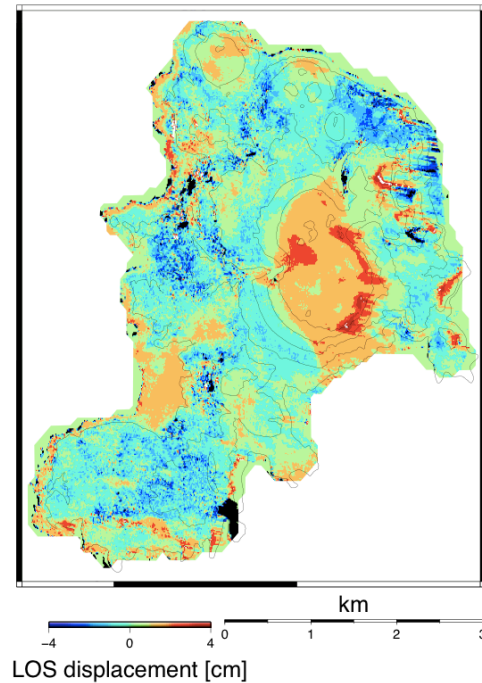


Fig. 4-2 r InSAR 解析結果 D-14（再掲）

以上のように、天上山周辺で比較的大きな地表変位が確認できる際は、水域変色が観測されていることが多く、天上山と変色水域の位置も近い。水域変色が火山活動に関連している可能性があることも考慮すると、火山活動と神津島北東部天上山周辺で確認できる比較的大きな地表変位には、何らかの関連がある可能性がある。ただし、地表変位の方法が必ずしも一致しているわけでは無い点については、今後さらに詳細な検討が必要である。この点については、たとえば、圧力源の膨張・収縮に伴う地表変位が神津島に発生しているため、逆方向の地表変位などが確認できている可能性がある。

7.2.2 推定された圧力源に関する検討

Fig. 6-2 から、推定された圧力源の位置は、神津島周辺に偏りなく分布している。そのため、圧力源位置の連続的な変化傾向を確認することは出来なかった。また、2013 年から 2018 年 12 月までのに観測された地震の震源位置や周辺水域の変色は、神津島北東部に分布しており、推定された圧力源の位置との間に明瞭な関係は見られなかった。しかし、推定された圧力源の位置と観測された地震の震源位置が整合的である逆解析結果も複数存在する。以下に、個々の逆解析結果について、検討した詳細を述べる。

Fig. 6-1 d, e, f, h, i, o, p で示した逆解析結果 D-4, 5, 6, 8, 9, 14 では、推定された圧力源位置は、観測された震源位置や、変色水域の位置と整合的であった。特に、D-4, 5, 8, 9, 14 においては、推定された圧力源による地表変位は、InSAR 解析結果が示す地表変位、特に天上山周辺の地表変位を良く表現できている。そのため、これらの解析結果で確認できる比較的大きな地表変位は推定された圧力源に起因する現象である可能性がある。

Fig. 6-1 a, b, c, g, j, k, l, m, n で示した逆解析結果 D-1, 2, 3, 7, 10, 11, 12, 13, 15 では、推定された圧力源位置は、観測された震源位置や、変色水域の位置とは不整合であった。しかし、この内、逆解析結果 D-1, 2, 3, 7, 12, 15 においては、推定された圧力源による地表変位は、InSAR 解析結果が示す地表変位、特に天上山周辺の地表変位を良く表現できている。そのため、球状の圧力源を仮定した逆解析は適切に実施できていると考えられる。この結果については、現在のところ明確な解釈は出せず、今後さらに詳細な検討が必要である。また、逆解析結果 D-10, 11, 13 においては、推定された圧力源による地表変位が InSAR 解析結果と異なる結果を示した。そのため、本研究に用いた球状の圧力源モデルでは、InSAR 解析結果を十分に説明できるような逆解析が実施出来ていない可能性が高い。これについては、今後、球状圧力源以外のモデル適用を検討する必要があると考えられる。

以上をまとめると、逆解析結果 D-5, 8, 9, 14 で確認された天上山周辺の比較的大きな地表変位は、推定された圧力源に起因したものである可能性が考えられ、それぞれの圧力源位置は、神津島東部地下約 6.9 km 神津島北東地下約 1.1 km, 神津島東部約 6.9 km, 神津島北東約 6.2 km の位置であった。その他の逆解析結果については、さらに詳細な検討が必要である。本来、圧力源は球状であるとは限らず、楕円状、パイプ状（上下方向に伸びた形状）など様々な形状をしており、また、それらが複合的に存在する。そのため、本研究において採用した球状圧力源以外の圧力源モデルの適用を考慮していく必要がある。

8 結論

8.1 まとめ

本研究では、神津島を対象として InSAR 解析に基づいた地表変位の調査を実施した。その結果、2014 年 12 月 4 日から、2018 年 11 月 29 日の約 4 年間で、4 cm 程度の地表変位が神津島に存在し、特に、神津島北東部天上山周辺で比較的大きな地表変位が存在することがわかった。また、そのような変位が確認できる時期には、周辺水域の変色が複数回観測されている。水域変色は火山活動に関連している可能性があることから、神津島では、火山活動に起因した地表変位が存在する可能性があることがわかった。

逆解析結果からは、2016 年 12 月 1 日～2017 年 3 月 23 日、2017 年 3 月 23 日～同年 6 月 29 日、2018 年 2 月 8 日～同年 5 月 3 日の天上山周辺の地表変位は、推定された圧力源の圧力変化に起因して発生したものである可能性が考えられる。これは、火山活動の変化によって、圧力源に圧力変化が生じたと仮定すれば、前述の期間に周辺水域の変色が観測されたこととも整合的である。

8.2 今後の課題

本研究では、球状の圧力源モデルを仮定し、逆解析を実施した。しかし、6.2.2 でも述べたように、圧力源モデルには、さらなる多様なモデルを検討すべきである。

また、5.1 干渉性の検討でも述べたように、本研究では InSAR 解析結果の干渉性が著しく低いものについては、再解析を繰り返し、解析領域全体の干渉性がある程度高くなったものを解析結果として採用した。ただし、ここでの判断基準は解析者の主観に依存したものであるため、客観的な閾値の設定は、今後の課題である。

引用文献

- Aoki, Y., P. Segall, T. Kato, P. Cervelli, and S. Shimada (1999) : Imaging magma transport during the 1997 seismic swarm off the Izu peninsula, *Science*, **286(5441)**, 927–930.
- Amelung, F., Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P. (2000) : Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry, *Nature*, **407**, 993-996.
- Chen, C. W. and H. A. Zebker (2002) : Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **40**, 1709-1719.
- Goldstein, R. M., and C. L. Werner (1998) : Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4035-4038.
- 藤原智・飛田幹男 (1999) : 地表変動検出のための干渉 SAR 画像作成技術, *測地学会誌*, **45**, 283-295.
- 福島資介・佐藤寛和・大谷康夫 (1981) : ランドサットデータによる火山性変色水の調査, *REPORT OF HYDROGRAPHIC RESEARCHES*, **16**, 48
- 火山噴火予知連絡会 (2015) : (その 9) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **133**, 52
- 火山噴火予知連絡会 (2016) : (その 8) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **135**, 56
- 火山噴火予知連絡会 (2016) : (その 3 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **136**, 48
- 火山噴火予知連絡会 (2017) : (その 3 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **137**, 73
- 火山噴火予知連絡会 (2017) : (その 7 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **138**, 63
- 火山噴火予知連絡会 (2017) : (その 3 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **139**, 60
- 火山噴火予知連絡会 (2018) : (その 6 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **141**, 65
- 火山噴火予知連絡会 (2018) : (その 6 の 4) 伊豆・小笠原諸島, 火山噴火予知連絡会資料, **142**, 59
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi (1983) : Optimization by Simulated Annealing,

- Science, **220**, 671-680.
- 気象庁気象研究所 (2016) : ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた桜島における SAR 干渉解析結果, 火山噴火予知連絡会会報, **122**, 431-435.
- 小林知勝・飛田幹男・小荒井 衛・乙井康成・中埜貴元 (2011) , 干渉 SAR のコヒーレンス変化から見る平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震に伴う液状化地域, 国土地理院時報, **122**, 143-151
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute (1993) : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, **364**, 138-142.
- 三尾有年 (2013) : 建設・国土防災分野における InSAR の実用化に関する調査研究, (一社) 日本リモートセンシング学会・国土防災リモートセンシング研究会, InSAR 実利用化 WG 活動報告.
- Mogi, K. (1958) : Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Res.Inst., **36**, 99-134.
- Murakami, M., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito, and H. Masaharu (1996) : Coseismic crustal deformations of 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometry, J. Geophys. Res., **101**, 8605-8614.
- 名古屋大学大学院理学研究科 (2001) : 水準測量による神津島島内の地殻上下変動 (2000 年 1 月～2001 年 4 月) , 地震予知連絡会会報, **66**, 203-205
- 名古屋大学大学院理学研究科・宇宙開発事業団・東京大学地震研究所 (2001) : GPS と精密重力観測による神津島における地殻変動 (1998.8～2000.3) , 火山噴火予知連絡会会報, **79**, 109-111
- 酒井慎一, 山田知朗, 井出哲, 望月将志, 塩原肇, ト部卓, 平田直, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 西澤あずさ, 藤江剛, 三ヶ田均 (2001) , 地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動, 地学雑誌, **110**, 145-155
- 上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅・仲井博之・本田昌樹・攪上泰亮・山下達也・矢来博司・小林知勝・森下遊 (2016) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, **128**, 139-146
- 山田晋也・森下 遊・和田弘人・吉川忠男・山中雅之・藤原 智・飛田幹男・矢来博司・小林知勝 (2015) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による御嶽山噴火に伴う地表変位の検出, 国土地理院時報, **127**, 11-15
- 山崎雅 (2018) : 地殻変動からマグマ溜まりを推論する, 地学雑誌 Journal of Geography(Chigaku Zasshi), **127**, 111-138.

謝辞

本研究を行い論文としてまとめるにあたり、様々な方にご協力頂きました。ここに感謝の意を示させていただきます。特に指導教官であり、本論文の査読も務めて下さった首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 准教授 小田義也先生や、副査を務めて下さった同大学院 准教授 吉嶺充俊先生、同じく教授 砂金伸治先生、特任研究員 東宏幸先生には、大変ご多忙の中、執筆の際の添削を始め、研究の進め方や研究に対する態度など様々なことをご教授頂きました。

また、京都大学大学院 工学研究科 助教 石塚師也先生には、研究方法の細かなアドバイスを、貴重なデータのご提供、研究結果の考察など、様々な面でお力添え頂きました。

ここまでで紹介させて頂いた先生方に加え、首都大学東京 臨時職員の福原順子様にも大変お世話になりました。学会への参加や現地観測の際の書類手続き等について、大変丁寧な指導を頂きました。

最後に、ここには名前を挙げるのでできなかった同研究室の同期をはじめ、先輩後輩の皆様、家族に深く感謝します。本当にありがとうございました。

なお本研究で利用した PALSAR-2 のデータの所有権は経済産業省および JAXA にあります。また、PALSAR-2 のデータは PIXEL (PALSAR interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、JAXA と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものです。